



IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RADAR MÓVIL USANDO UN SENSOR DOPPLER PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

ANDRÉS MAURICIO BARRETO CHITIVA

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO, COLOMBIA
2019**

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RADAR MÓVIL USANDO UN SENSOR DOPPLER PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

ANDRÉS MAURICIO BARRETO CHITIVA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Director

Sebastián Puente Reyes

Ingeniero electrónico con maestría en ingeniería de telecomunicación

Docente de Planta, programa de Ingeniería electrónica

Codirector

Felipe Andrés Silva Gómez

**Ingeniero electrónico con maestría en radar, tecnologías y equipos y diseño
de sistemas**

Miembro de GIDS de CODALTEC

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
VILLAVICENCIO, COLOMBIA
2019**

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

AUTORIZACIÓN

Yo ANDRES MAURICIO BARRETO CHITIVA mayor de edad, vecino en la ciudad Villavicencio-Meta, identificado con la Cédula de Ciudadanía No. 1121928407 de Villavicencio-Meta, actuando en nombre propio en mi calidad de autor del trabajo de tesis, monografía o trabajo de grado denominado IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA RADAR MÓVIL USANDO UN SENSOR DOPPLER PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS ,hago entrega del ejemplar y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD-ROM) y autorizo a la **UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS**, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, con la finalidad de que se utilice y use en todas sus formas, realice la reproducción, comunicación pública, edición y distribución, en formato impreso y digital, o formato conocido o por conocer de manera total y parcial de mi trabajo de grado o tesis.

EL AUTOR – ANDRES MAURICIO BARRETO CHITIVA, Como autor, manifiesto que el trabajo de grado o tesis objeto de la presente autorización, es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros; por tanto, la obra es de mi exclusiva autoría y poseo la titularidad sobre la misma; en caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, como autor, asumiré toda la responsabilidad, y saldré en defensa de los derechos aquí autorizados, para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia, se firma el presente documento en dos (2) ejemplares del mismo valor y tenor en Villavicencio - Meta, a los 13 días del mes de marzo del 2019

EL AUTOR – ESTUDIANTE

Firma _____
Nombre: _____
C.C. No. _____ de _____

Nota de Aceptación:

Ing. Javier Andres Vargas Guativa
Jurado

Ing. Sebastián Puente Reyes
Director

Villavicencio 13 de marzo del 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización del proyecto. Primero agradezco a mi madre por ayudarme y apoyarme en la culminación de esta meta y por estar conmigo en cada momento de mi vida.

También quisiera agradecer a mis profesores por sus enseñanzas y exigencias para poder hoy alcanza esta meta, al director del proyecto Sebastián Puente Reyes por sus correcciones y sugerencias, además de su disposición de ayudar en cada momento.

Igualmente quisiera agradecer al grupo de investigación GIDS de CODALTEC, por su colaboración, paciencia y por su ayuda en el transcurso de la pasantía, en especial quiero dar gracias infinitas a los ingenieros Felipe Silva, Tomas Guzmán y Yolanda parra, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por sus enseñanzas, consejos y por hacer de esta experiencia única y valiosa, sin ustedes nada de esto sería posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
JUSTIFICACIÓN	12
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Problema	13
2. OBJETIVO	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. METODOLOGÍA	14
4. MARCO CONTEXTUAL	14
4.1 Clutter	14
4.2 RCS (Radar Cross-Section)	15
4.3 Sistemas radar	16
4.3.1 Número de antenas	17
4.3.2 Frecuencia de trabajo	17
4.3.3 Forma de onda	17
4.3.4 Principio del Efecto Doppler	18
4.3.5 Tipos de sensores radar para la detección de obstáculos	20
5. IMPLEMENTACIÓN	21
5.1 Hardware	22
5.1.1 Modulo HB100	22
5.1.2 Hardware de adquisición	24
5.1.3 Sistema de Visualizacion	30
5.2 Software	30
5.2.1 Timer	33
5.2.2 ADC	34
5.2.3 Filtro Digital	36
5.2.4 Procesamiento	41
5.2.5 Visualización de distancia	43
5.3 Plataforma móvil	44
5.3.1 Plataforma Robótica	44
5.3.2 Puente H L298N	44
5.3.3 Tarjeta de programación Arduino	45
5.3.4 Aplicación Android (App)	45
5.3.5 Módulo Bluetooth	46
6. PROTOCOLO DE PRUEBAS	47
6.1 Objetivo:	47

6.2	Elementos necesarios:	47
6.2.1	Plataforma móvil con sensor radar embarcado	47
6.2.2	Obstáculo de pruebas:	47
6.2.1	Medidor de distancia:	48
6.2.2	Sistema de grabado de videos	48
6.3	Escenario de pruebas:	49
6.3.1	Escenario 1	49
6.3.2	Escenario 2	49
6.4	Determinación del número de muestras	50
6.5	Procedimiento:	51
6.5.1	Pruebas blanco en movimiento, radar estático	51
6.6	Pruebas radar en movimiento, blanco estático:	53
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	55
7.1	Resultados Pruebas con radar estático y blanco en movimiento	55
7.2	Análisis Pruebas con radar estático y blanco en movimiento	56
7.3	Resultados Pruebas con radar en movimiento y blanco estático	56
7.3.1	Pared	57
7.3.2	Sillas	59
7.3.3	Persona	61
7.3.4	Rama	63
7.3.5	Sin obstáculo	65
7.3.6	Pared, sillas y personas:	66
7.3.7	Pared, sillas, personas y rama:	67
7.4	Análisis pruebas con radar en movimiento y obstáculos estáticos	68
7.4.1	Análisis resultados separados	68
7.4.2	Análisis conjunto sin rama	69
7.4.3	Análisis conjunto de los obstáculos	70
7.5	Dificultades encontradas	70
8.	CONCLUSIONES	72
9.	REFERENCIAS	73
10.	ANEXOS:	75
10.1	Código en C sistema radar móvil:	75
10.2	Tabla de datos pruebas estáticas	78
10.3	Tabla de datos pruebas movimiento:	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Entorno real con Clutter (3)	15
Figura 2. Fórmulas para el cálculo de RCS de algunas figuras geométricas (6)	16
Figura 3. Sistema radar (7)	17
Figura 4. Efecto Doppler (10)	18
Figura 5. Señal salida sensor FW-CW (1)	20
Figura 6. Señal salida sensor CW (12)	20
Figura 7. Aplicación de un radar onda continua (CW). (15)	21
Figura 8. Bosquejo sistema radar móvil	22
Figura 9. Sensor radar HB100. (16)	23
Figura 10. Patrón de radiación. (16)	23
Figura 11. Señal sensor sin obstáculos	24
Figura 12. Señal del sensor con obstáculo 1.5m	24
Figura 13. Señal del sensor con obstáculo 10cm	24
Figura 14. Diagrama de bloques hardware de adquisición	24
Figura 15. Representación ADC (convertor análogo digital) (17)	25
Figura 16. Circuito de acondicionamiento sensor radar	27
Figura 17. Salida de un amplificador común (21)	28
Figura 18. Salida de un amplificador rail to rail (21)	29
Figura 19. STEMLab Red Pitaya.	31
Figura 20. gráfico herramienta de programación y comunicación	32
Figura 21. Diagrama de flujo del software	33
Figura 22. Función TiempoUs	34
Figura 23. Función ADC	35
Figura 24. Implementación función Timer y función ADC	35
Figura 25. diagrama de bloques de un filtro digital	36
Figura 26. Respuesta en frecuencia de un filtro digital (30).	37
Figura 27. Respuesta en el tiempo ventanas Hamming, Hanning, Rectangular.	38
Figura 28. Diagrama de flujo del filtro FIR orden 17	39
Figura 29. Herramienta de Matlab fdatool	40
Figura 30. Visualización ADC Y Filtro digital	40
Figura 31. Diagrama de flujo etapa de procesamiento	41
Figura 32. Diagrama de flujo etapa de Visualización	43
Figura 33. Plataforma móvil	44
Figura 34. Módulo Puente H L298N (34)	45
Figura 35. Tarjeta de programación Arduino uno (35)	45
Figura 36. Aplicación Android	46
Figura 37. Módulo inalámbrico Bluetooth HC06 (36)	46
Figura 38. Sistema radar móvil	47
Figura 39. Plataforma móvil córner reflecto	48
Figura 40. Obstáculos pruebas en movimiento	48
Figura 41. Escenario de pruebas estáticas	49
Figura 42. Escenario de pruebas móviles	50
Figura 43. Representación pruebas estáticas	52
Figura 44. Representación pruebas en movimiento	54
Figura 45. Resultados pruebas radar estático	55
Figura 46. Montaje pruebas en pared	57
Figura 47. Histograma resultados pared	58
Figura 48. Densidad de probabilidad pared	59
Figura 49. Montaje prueba en silla	60
Figura 50. Histograma resultados sillas	60
Figura 51. Densidad de probabilidad sillas	61
Figura 52. Montaje pruebas en persona	62

Figura 53.Histograma resultados persona	62
Figura 54.Densidad de probabilidad persona.....	63
Figura 55.Montaje pruebas en rama	64
Figura 56.Histograma resultados rama	64
Figura 57.Densidad de probabilidad rama	65
Figura 58.Densidad de probabilidad conjunta pared, sillas y persona	66
Figura 59.Densidad de probabilidad conjunta de todos los obstáculos	67
Figura 60.Comparación persona contra rama	69
Figura 61.Escenario de pruebas con rieles	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.valores típicos de RCS de varios objetos en banda X.....	16
Tabla 2. Bloques de función y consumo Radar Doppler	30
Tabla 3.Valores de $Z\alpha$ para diferentes niveles de confianza	50
Tabla 4Valores de $Z\beta$ para diferentes niveles de poder estadístico	51
Tabla 5.Toma de datos pruebas estáticas	53
Tabla 6.Toma de datos pruebas en movimiento	54
Tabla 7.valores de media, varianza, desviación pared.....	58
Tabla 8.valores de media, varianza, desviación sillas	61
Tabla 9.valores de media, varianza, desviación persona	63
Tabla 10.valores de media, varianza, desviación rama	65
Tabla 11.valores de media, varianza, desviación para los 3 primeros obstáculos	66
Tabla 12.valores de media, varianza, desviación para todos los obstáculos	67
Tabla 13. datos pruebas estáticas.....	78
Tabla 14.Datos pruebas en movimiento	79

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto consiste en la implementación de un sistema radar móvil de corto alcance, utilizando un sensor Doppler de onda continua de bajo costo para la detección de obstáculos. Para la detección de obstáculos se utilizan generalmente sistemas infrarrojos, cámaras y ultrasonidos, entre otros. La tecnología radar tiene un amplio campo de investigación y uso, la ventaja de los sistemas radares en comparación a las tecnologías mencionadas anteriormente, es que las señales emitidas sufren menos cambios en condiciones ambientales como lluvia, neblina y diferentes escenarios de luz.

Utilizando la amplitud de la señal recibida de un sensor radar onda continua se dio un estimado del rango de distancia donde se encontraba el obstáculo, valiéndonos del hecho que existe un movimiento relativo entre la distancia de separación del blanco y el radar. Para la adquisición de las señales radar se usó una tarjeta de adquisición STEMLab Red pitaya, la cual tiene una velocidad de adquisición de 125MS/s y las API del fabricante son muy sencillas de implementar. Se estableció conexión SSH y se aplicaron comandos en sistema operativo Linux que hoy en día son muy importantes para comunicación de redes. Además, esta tarjeta nunca se había trabajado en la universidad de los llanos.

El proyecto se realizó por modalidad pasantía para terminar los estudios de pregrado y obtener el título de ingeniero electrónico, realizar prácticas en una empresa ayuda mucho para aprender sobre el ambiente interno, adaptarse a un horario laboral, realizar cotizaciones, hablar con proveedores, trabajar con equipos profesionales, aprender nuevo conocimiento del grupo de trabajo y obtener experiencia laboral que hoy en día es un factor importante para un recién egresado.

Palabras Clave—. Sensores radar, procesamiento de señal radar, detección de obstáculos, efecto Doppler, sistema radar móvil.

ABSTRACT

The main objective of this project is the implementation of a short-range mobile radar system, using a low-cost continuous wave Doppler sensor for the detection of obstacles. For the detection of obstacles, they are usually used infrared systems, cameras and ultrasounds, among others. Radar technology has a wide field of research and use, the advantage of radar systems compared to the technologies mentioned above, is that the signals emitted suffer less changes in environmental conditions such as rain, fog and different light scenarios.

Using the amplitude of the signal received from a continuous wave radar sensor, an estimate was given of the distance range where the obstacle was located, taking into account the fact that there is a relative movement between the separation distance of the target and the radar. For the acquisition of the radar signals, a STEMLab Red pitaya acquisition card was used, which has an acquisition speed of 125MS / s and the APIs of the manufacturer are very simple to implement. An SSH connection was established and commands were applied in the Linux operating system that are nowadays very important for network communication. Besides, this card had never been worked in the university of the plains.

The project was carried out by internship to finish the undergraduate studies and obtain the title of electronic engineer, doing internships in a company helps a lot to learn about the internal environment, adapt to a working schedule, make contributions, talk with suppliers, work with professional teams, learn new knowledge of the work group and obtain work experience that today is an important factor for a recent graduate.

Keywords-. Radar sensors, radar signal processing, obstacle detection, Doppler effect, mobile radar system

JUSTIFICACIÓN

La división de sensores de CODALTEC está actualmente trabajando en el desarrollo de sistemas de detección de obstáculos sobre plataformas que estén en movimiento. Para este tipo de tareas, habitualmente se usan diferentes tipos de sensores como: ultrasónicos, infrarrojos y cámaras. Adicionalmente, existe la tecnología radar que tiene la ventaja de funcionar en cualquier tipo de condición ambiental. Los radares trabajan emitiendo una onda electromagnética y capturando su eco para determinar propiedades del blanco.

Existen varias tipologías de sensores radar: radares pulsados, radares de onda continua con modulación en frecuencia y radares Doppler, entre otros. Un radar Doppler se usa para detectar movimiento, es capaz de determinar velocidad, pero no la distancia entre blanco y el radar. Sin embargo, el sistema Doppler tiene un menor costo que los sensores radar modulados en frecuencia, y facilita el procesamiento de señal, por lo que en el presente proyecto se busca determinar el comportamiento de este sensor en una plataforma en movimiento con el propósito de detectar obstáculos. Para lograr este objetivo será necesario realizar una revisión bibliográfica, diseños, implementación y pruebas de validación.

Desde el punto de vista de crecimiento profesional, la realización de una pasantía ayuda en la formación de habilidades complementarias a la formación académica recibida en el programa de ingeniería electrónica, en la búsqueda de soluciones a problemáticas reales y ayuda a fortalecer el vínculo academia – empresa, necesaria para el desarrollo de la región.

1. INTRODUCCIÓN

En aplicaciones para detección de objetos generalmente se emplean con mucha más frecuencia sistemas con tecnologías de sensores ultrasónicos, infrarrojos, acústicos u optrónicos. Sin embargo, estos sensores tienden a distorsionar las señales que se emiten en condiciones ambientales como lluvia, presencia de niebla, oscuridad o diferentes tipos de iluminación. La tecnología radar tiene la ventaja de funcionar en cualquier tipo de condición ambiental. En la práctica, un sistema radar puede ser capaz de medir dirección, altura, distancia, y/o velocidad a partir del eco reflejado por objetos tanto estáticos como móviles (1). El conjunto de sistemas radar se pueden clasificar en función del tipo de señal de emisión: pulsados o de onda continua.

Los radares pulsados transmiten señales de corta duración y elevada potencia para detectar objetivos a distancias de decenas de kilómetros. Por lo general, suelen necesitar potencias del orden de kilovatios lo cual los hace relativamente grandes.

En los radares CW (Continuos Wave), la potencia pico transmitida es mucho menor que en uno pulsado; sin embargo, la potencia media emitida puede llegar a ser similar permitiendo alcances comparables a los sistemas pulsados. De esta forma pueden diseñarse radares de baja complejidad y costo, además de facilitar un diseño compacto y manejable. Dentro de este grupo de radares CW se pueden diferenciar dos opciones según la modulación de su señal:

- *No modulados*: en algunas aplicaciones de medida de velocidad, esta puede obtenerse mediante la observación del desplazamiento Doppler de las señales reflejadas por blancos móviles. La emisión de una portadora no modulada es suficiente en este caso,

simplificando así el diseño del radar. Sin embargo, al no existir referencias temporales en la señal no es posible determinar la distancia de los blancos.

- *Modulados*: en aquellas aplicaciones que requieren estimar tanto la velocidad como la distancia del blanco es preciso introducir una modulación en la señal radiada. En un sistema CW la amplitud de la señal es constante y la modulación habitualmente utilizada es una de frecuencia lineal. (2)

Este documento describe el proceso de diseño y los resultados obtenidos de un sistema radar móvil usando un radar de onda continua (CW), tiene un sistema hardware de acondicionamiento para la señal de salida sensor CW y un sistema software el cual se usó para analizar y procesar la señal del sensor CW. Hasta el momento los radares desarrollados por el grupo de investigación y desarrollo de sensores GIDS de CODALTEC, han sido todos fijos. Pero ¿Qué ocurre si el radar está en movimiento?, por tal motivo se desarrolló un protocolo de pruebas para analizar los resultados. Este sistema radar tiene como componente central un módulo HB100 el cual es un módulo radar de onda continua.

Este trabajo se realizó para terminar los estudios de pregrado realizados en la universidad de los llanos, para el título de ingeniero electrónico, por modalidad Pasantía. Para estudiantes de último semestre es importante realizar prácticas en una empresa, así se aprende sobre el ambiente interno de la empresa, adaptarse a un horario laboral, realizar cotizaciones, hablar con proveedores, trabajar con equipos profesionales y lo más importante aprender nuevo conocimiento del grupo de trabajo.

1.1 Problema

Los avances en la tecnología tienden a evolucionar el diseño y el uso de sistemas radar. Actualmente el uso de sistemas radar para la defensa es una de las principales aplicaciones de la tecnología. Por ejemplo, el TADER y el SINDER son dos radares fabricados por la empresa CODALTEC para la detección aérea y de superficie respectivamente. Con el propósito de continuar trabajando con la temática radar, pero buscando aplicaciones más relacionadas con el ámbito civil, la empresa CODALTEC está trabajando en un asistente de visión para personas invidentes.

Uno de los retos de este proyecto es observar el comportamiento de la señal arrojada por un sensor radar tanto en amplitud como frecuencia, cuando se encuentra en una posición móvil ya que actualmente solo se han trabajado con sistemas estáticos para la detección de obstáculos. Para solucionar esta interrogante, se muestran a continuación los objetivos de este proyecto.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo general

Implementar y validar el funcionamiento de un sistema radar móvil usando un sensor Doppler para la detección de obstáculos.

2.2 Objetivos específicos

- Diseñar los componentes hardware, software e interconexión del sistema radar móvil.
- Implementar el software de procesamiento, la comunicación del sistema y la integración del hardware del sistema.

- Realizar la validación del sistema por medio de la ejecución del protocolo de pruebas.

3. METODOLOGÍA

La metodología usada para el desarrollo de este proyecto consiste en la planeación, ejecución y documentación de 4 etapas de trabajo las cuales se realizarán secuencialmente de forma periódica.

Etapas 1: Consiste en:

- *Revisión bibliográfica
- * Introducción a sistemas embebidos usando sistema de procesamiento
- * Análisis e implementación de fuente de alimentación
- *Análisis de interconexiones del sistema.

Etapas 2: Consiste en:

- * Análisis y diseño de estructura para pruebas
- * Implementación y validación de sensor
- * Diseño e implementación de visualización y grabado de datos.

Etapas 3: Consiste en:

- * Diseño e implementación de procesamiento de datos y comunicación entre sensor y sistema embebido de procesamiento
- * Integración de elementos del sistema radar
- * Diseño e implementación de protocolo de pruebas

Etapas 4: Consiste en:

- * Redacción de informes y documentación
- * Sustentación de proyecto.

4. MARCO CONTEXTUAL

4.1 Clutter

El Clutter es un ruido provocado por los ecos o reflexiones en elementos ajenos al sistema, que reducen sensiblemente la relación señal/ruido y, por lo tanto, evitan que la detección de los blancos deseados sea óptima (3). En la Figura 1, se muestra un entorno real en el que un radar montado sobre un barco encontrará diversos elementos que producirán un eco indeseado.

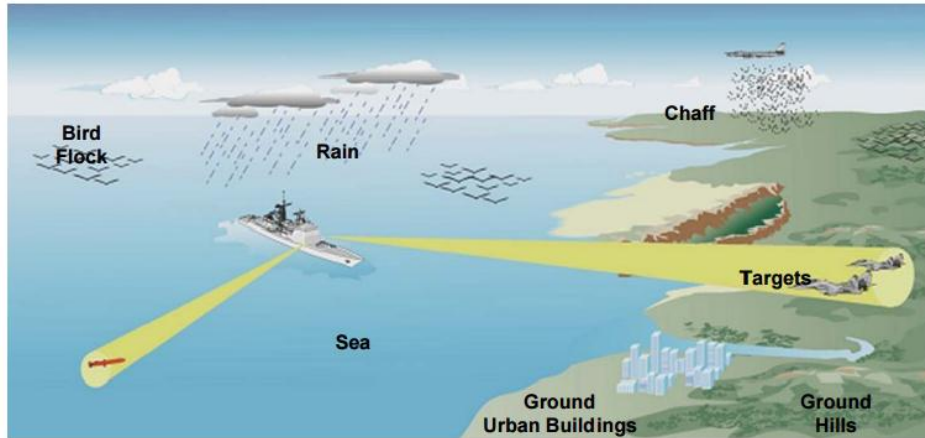


Figura 1. Entorno real con Clutter (3)

4.2 RCS (Radar Cross-Section)

La sección transversal de radar (RCS) es una medida de la capacidad de un objetivo para reflejar señales radar hacia el receptor. La definición conceptual de RCS incluye el hecho de que sólo una parte de la energía radiada se ilumina el blanco y devuelve una parte pequeña en el receptor (4). La RCS tienen unidades en m^2 , esta unidad muestra que la sección transversal del radar es un área, entonces si toda la energía transmitida por el radar hacia el obstáculo se reflejara de igual manera en todas las direcciones entonces, la sección transversal del radar sería igual al área de la sección transversal del obstáculo (5), esto quiere decir que, si un radar emite una señal y la señal emitida se refleja con la misma potencia entonces la RCS del obstáculo será igual al área de la sección donde la señal emitida choco con el obstáculo, pero en la práctica se absorbe algo de energía y la energía reflejada no se distribuye por igual en todas las direcciones. Por lo tanto, la sección transversal del radar es bastante difícil de estimar y normalmente se determina mediante la medición.

La ecuación que marca el standard de IEEE para la RCS es:

$$\sigma = 4\pi \frac{PS}{\Omega p_i}$$

Donde:

PS (watts): es la potencia dispersada en una dirección específica.

Ω : es el ángulo solido sobre el que la potencia es dispersada.

P_i : es la densidad de potencia (watts/m²) de la onda plana en el blanco.

Cuando las ondas de radar se transmiten sobre un blanco, sólo una cierta cantidad de energía es reflejada de vuelta. Un número de diferentes factores que influyen en el valor del RCS como:

- El material del que está hecho el blanco.
- El tamaño absoluto del blanco.
- El tamaño relativo del blanco (en relación con la longitud de onda del radar).
- El ángulo de incidencia (ángulo con que las ondas de radar llegan a cada punto de la superficie del blanco, el cual depende de la forma del blanco y su orientación respecto a la fuente del radar).
- El ángulo reflejado (ángulo con el que la onda reflejada sale del blanco, que a su vez depende del ángulo de incidencia).

- Potencia de la señal transmitida del radar.
- Distancia entre el radar y el blanco. (3)

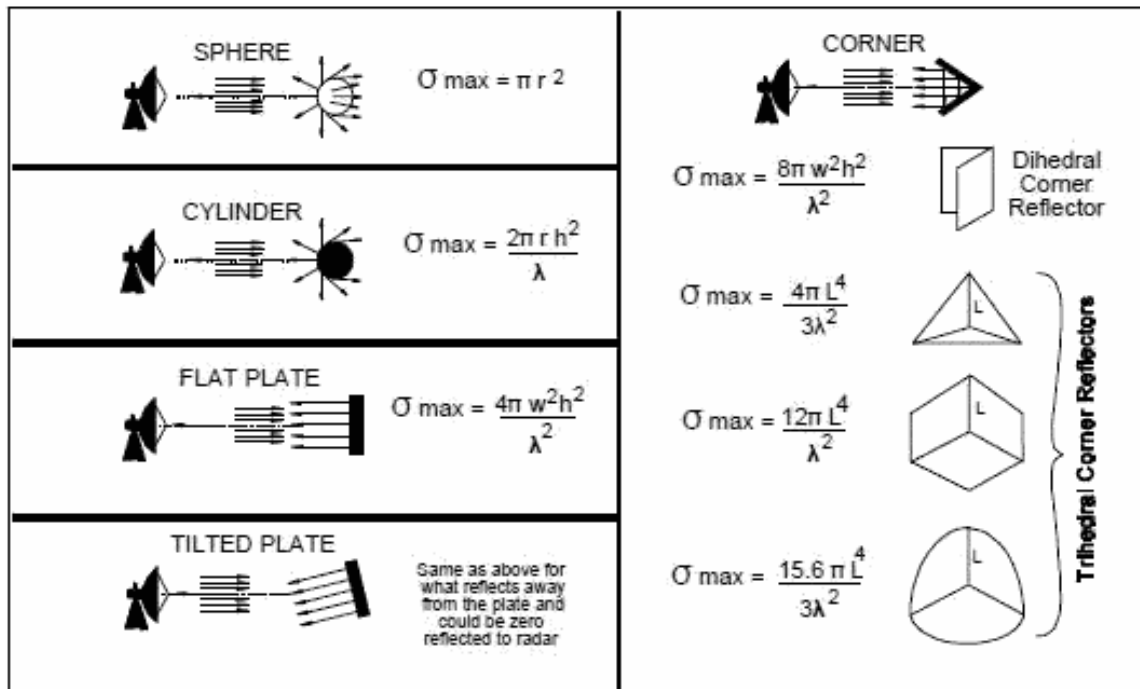


Figura 2. Fórmulas para el cálculo de RCS de algunas figuras geométricas (6)

En la Figura 2, se muestra las fórmulas para calcular la RCS de varias figuras geométricas, estas fórmulas no son aplicables para todos los objetos por tal motivo existe una estandarización de la RCS para diferentes obstáculos. En la Tabla 1 se muestra la RCS de algunos objetos.

Tabla 1. valores típicos de RCS de varios objetos en banda X

Objeto	RCS (m^2)	RCS (dBm^2)
Camioneta	200	23
Automóvil	100	20
Jumbo jet	100	20
bote	10	10
Gran avión de combate	6	7.78
Pequeño avión de combate	2	3
persona	1	0
pájaro	0.01	-20
insecto	1×10^{-5}	-60

En la Tabla 1, se muestran el valor numérico de la RCS de algunos objetos. En sistemas radar la RCS es un aspecto fundamental al momento de detectar obstáculos porque entre mayor RCS es más fácil la detección.

4.3 Sistemas radar

Un RADAR (Radio Detection and Ranging) como sus siglas en inglés, se puede definir como un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos (7). Como se muestra en la Figura 3, el cual es un caso de radar de tránsito para la detección de vehículos.



Figura 3. Sistema radar (8)

Los sistemas radares puede clasificarse según una serie de aspectos básico:

4.3.1 Número de antenas

En función del número de antenas distinguimos entre estos tipos de sistemas radar:

- Monoestático: una sola antena transmite y recibe.
- Biestático: una antena transmite y otra recibe, en el mismo o diferente emplazamiento.
- Multiestático: combina la información recibida por varias antenas.

4.3.2 Frecuencia de trabajo

El ancho de banda determina la resolución y precisión del radar. Es por ello, que se distinguen diferentes bandas de trabajo de los sistemas radar, que, a su vez, delimitan el tipo de aplicación para el que será utilizado.

4.3.3 Forma de onda

Se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Radar de onda pulsada: Se transmite un pulso, que puede estar modulado o no, y se espera a recibir su eco, antes de lanzar el siguiente pulso. (9). En este tipo de radar, la posibilidad de medir la distancia del blanco está ligada al ancho de banda. Básicamente Envía señales en ráfagas muy cortas (millonésimas de segundo) pero de una potencia muy elevada. Para lograr grandes distancias suelen necesitar potencias del orden de kilovatios lo cual los hace relativamente grandes. (1)

- Radar de onda continua (CW): Los radares de onda continua, como su nombre indica, utilizan señales continuas en vez de ráfagas cortas. En este tipo de radar, la posibilidad de medir la distancia del blanco está ligada al ancho de banda (1). Si se requiere estimar tanto la velocidad como la distancia del blanco es preciso realizar una modulación en la señal radiada, el espectro de las transmisiones de CW puede ser modulado sea en frecuencia (FM-CW) como en amplitud (AM-CW).

Realizando comparaciones entre las características de los radares mencionados anteriormente, los radares de onda continua tienen ventajas frente a los radares pulsados, la principal desventaja es el aislamiento entre la antena transmisora y la antena receptora, lo que limita el alcance de detección, por eso es más frecuente el uso de radares de onda pulsada para detecciones de largo alcance. Las aplicaciones más usadas para los radares onda continua son:

- Detección de intrusos
- Detección de velocidad de tráfico
- Radares anticolidión para la industria automotriz
- Imágenes radar

El enfoque principal de este proyecto se concentra en la detección de obstáculos a distancias menores de 2m, por tal motivo se manejó un radar onda continua, los radares pulsados no suelen utilizarse en distancias cortas, porque representa una gran complejidad conmutar los circuitos en tiempos cortos y generar pulsos muy angostos, también porque requieren una mayor potencia, y eso genera un costo mayor. Los radares de onda continua brindan un simple método de detección de movimiento por medio del efecto Doppler.

4.3.4 Principio del Efecto Doppler

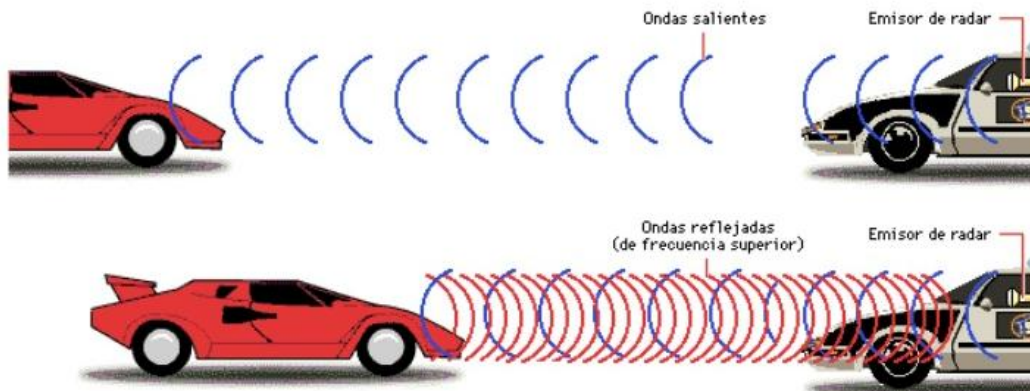


Figura 4.Efecto Doppler (10)

Cuando se emite una señal de forma continua con una longitud de onda determinada y choca con un objeto sólido, parte de la señal regresa, pero si el objeto está en movimiento tendrá una frecuencia ligeramente diferente (11). Como se muestra en la Figura 4, el carro gris tiene un sensor que emite una señal que, al reflejarse con el carro rojo, el cual se encuentra en movimiento, regresa con menos potencia y con una frecuencia diferente, la frecuencia de la señal recibida es directamente proporcional a la velocidad del objeto.

Los detectores de vehículos emiten energía a altas frecuencias (10,525 GHz) en la dirección en la que se desplazan los vehículos, detectan la intensidad y velocidad de los vehículos por el cambio en la frecuencia de la señal emitida debido al efecto Doppler, que es proporcional a la velocidad del vehículo. (11)

4.3.5 Tipos de sensores radar para la detección de obstáculos

- Sensor FM-CW: los radares de onda continua y frecuencia modulada FM-CW varían su frecuencia de trabajo durante la medida, es decir, la señal transmitida por este tipo de radar se encuentra modulada en frecuencia (1). Dicha modulación frecuencial proporciona la capacidad para medir distancias de un blanco ya que la modulación proporciona una referencia temporal, además existen métodos para obtener la velocidad del blanco, por ejemplo, el cambio de frecuencia de la señal recibida. Comúnmente, en los sistemas radar FM-CW se utiliza la modulación diente de sierra o la modulación triangular. Como se muestra en la Figura 5, se presenta la señal transmitida para una modulación triangular, esto se logra utilizando un VCO (oscilador controlado por voltaje), se le introduce un voltaje que vaya cambiando con el tiempo el cual será directamente proporcional a la frecuencia de la señal de salida, es decir si el voltaje aumenta la frecuencia de la señal de salida de VCO aumenta, si el voltaje disminuye la frecuencia disminuye, por tal motivo al ingresar una señal triangular al VCO, en la gráfica la señal inicia con una frecuencia que va aumentando al igual que la señal triangular, ya en la mitad de la gráfica la señal va disminuyendo igual que la señal triangular hasta volver a su estado inicial.
- Sensor onda continua CW: usa el efecto Doppler para medir la velocidad de un objeto en movimiento. No detecta distancia, pero detecta velocidad, se usa en la industria ya que su costo es reducido en comparación a otro tipo de sensores (11), en la Figura 6, se muestra la respuesta de un sensor CW de un objeto moviéndose en dirección hacia el sensor radar y que después se detuvo.

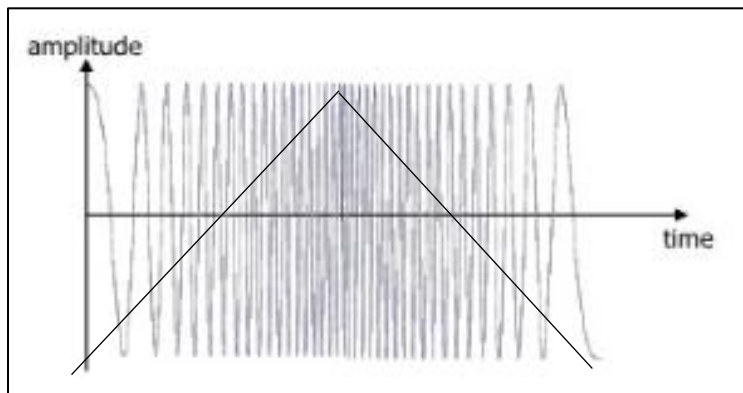


Figura 5. Señal salida sensor FW-CW (1)

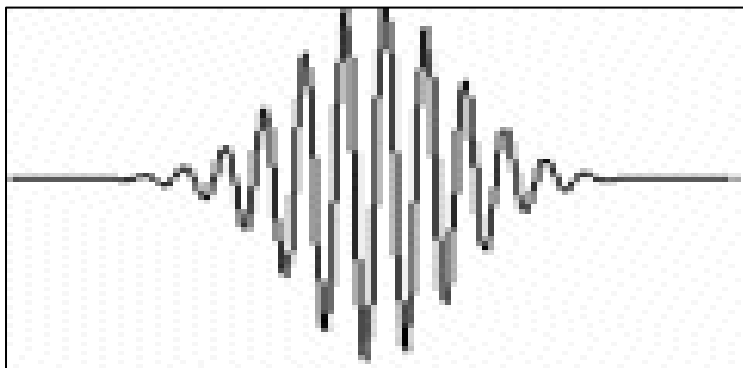


Figura 6. Señal salida sensor CW (12)

Como los radares de onda continua tienen un transmisor que emite una señal continuamente y un receptor que recibe señales constantemente, es muy típico el uso de dos diferentes antenas: una para el transmisor y otra para el receptor (13).

La información de velocidad en los radares onda continua, puede ser obtenida analizando la diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida, este cambio de frecuencia ocurre debido al efecto Doppler. El efecto Doppler se produce cuando el objeto tiene una velocidad radial diferente a cero, esto significa que el objeto debe estar en movimiento respecto al radar. La frecuencia en el receptor es (14):

$$f_r = f_0 - \frac{2 * f_0}{c} v_r$$

Donde: f_r : Frecuencia del receptor
 f_0 : Frecuencia del transmisor
 c : Velocidad de la luz = $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 v_r : Velocidad radial

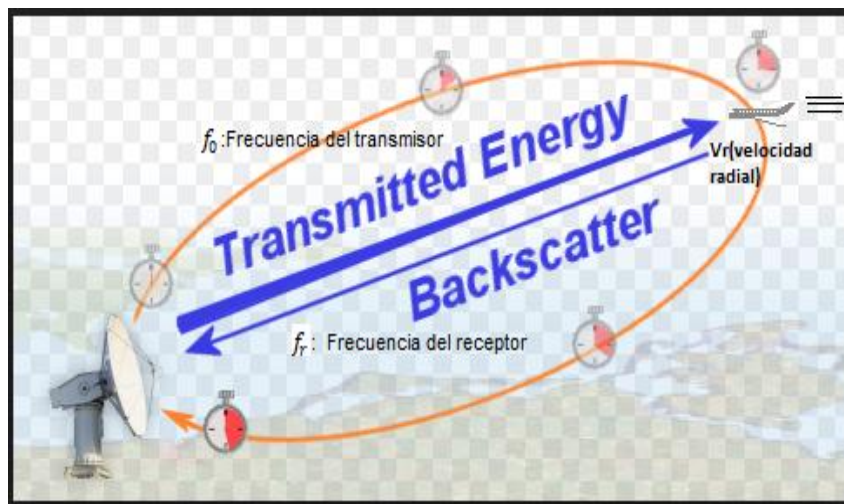


Figura 7. Aplicación de un radar onda continua (CW). (15)

En la Figura 7 se muestra un sistema radar onda continua. Hay un objeto en movimiento, el radar transmite una señal con una frecuencia y una potencia determinada, la señal choca con el objeto, parte de la señal se refleja con una frecuencia diferente a la emitida, si la señal reflejada es mayor que la señal transmitida el objeto se está acercando al radar, pero si la señal transmitida es mayor que la señal reflejada el objeto se está alejando del radar. En receptor se extrae la diferencia entre la señal transmitida y la reflejada y esa diferencia es la señal de salida del sensor.

5. IMPLEMENTACIÓN

En esta parte se muestra el diseño e implementación de cada una de las etapas del proyecto, la idea principal de este proyecto consiste en la validación de un sistema radar onda continua (CW), montado sobre una plataforma móvil para la detección de obstáculos, adquiriendo señales digitales

y realizando el respectivo procesamiento utilizando una tarjeta de adquisición de datos (STEMlab Red-Pitaya). En la Figura 8 se muestra el concepto general del proyecto.

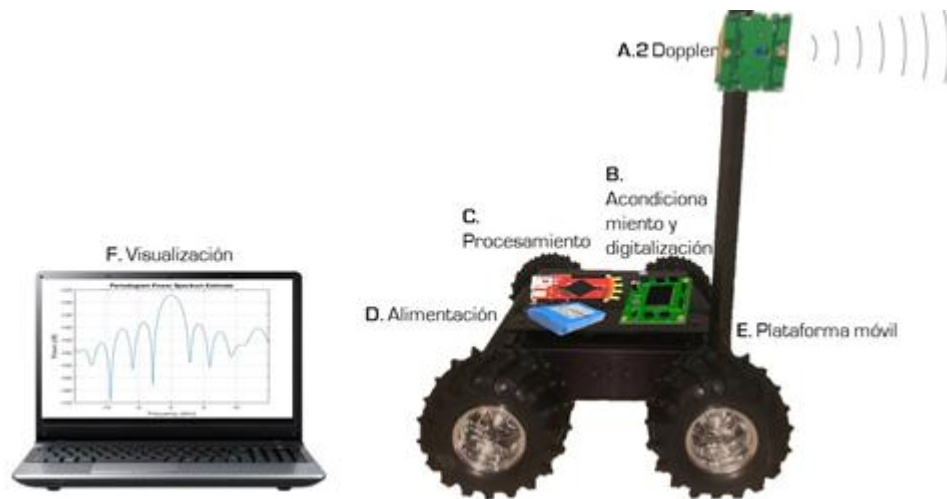


Figura 8. Bosquejo sistema radar móvil

El sistema radar móvil se compone de los siguientes bloques de función:

- Plataforma móvil: Consiste en un carro 4x4 con motorreductores con enconders.
- Modulo HB100: Proveniente de la empresa MICROWAVE SOLUTIONS. Este módulo sirve para sistemas de bajo costo en aplicación que se necesite medir velocidad o presencia de un objeto en movimiento.
- El hardware de adquisición: Se diseño de estudios previos realizados por el grupo de investigación GIDS de CODALTEC.
- STEMlab Red Pitaya: Es un computador de bolsillo, un sistema electrónico de código abierto para aplicaciones de control y medición, con el tamaño de una tarjeta de crédito. Tiene similitudes con sistemas como Raspberry Pi, con un sistema operativo basado en Linux contiene Hardware dedicado para la adquisición y generación de señales analógicas y una CPU con una FPGA programable para realizar tareas de procesamiento digital de señales.
- Hardware de visualizacion de distancia: consiste en unos leds de diferentes colores para indicar la distancia aproximada a la cual se encuentra el obstáculo

5.1 Hardware

5.1.1 Modulo HB100

Este es un subsistema que emite una señal en banda-x, recibe una señal y realiza una mezcla con las muestras de la señal enviada. La señal de salida del módulo es una señal de frecuencia intermedia que es proporcional a la señal de cambio Doppler que ha sufrido, este cambio está dado por los objetos que tienen una velocidad radial relativa a la del módulo. La velocidad radial se refiere al movimiento que tienen los objetos que van hacia el radar o se alejan de él, esto crea una

breve modificación en la frecuencia recibida debido al efecto Doppler (14). En la Figura 9 se muestra la imagen del módulo implementado en el proyecto. Este módulo es proveniente de la empresa AGILSENSE.

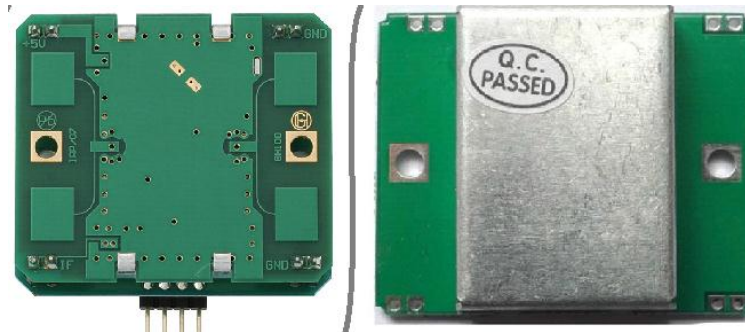


Figura 9. Sensor radar HB100. (16)

Antenna Beam Pattern

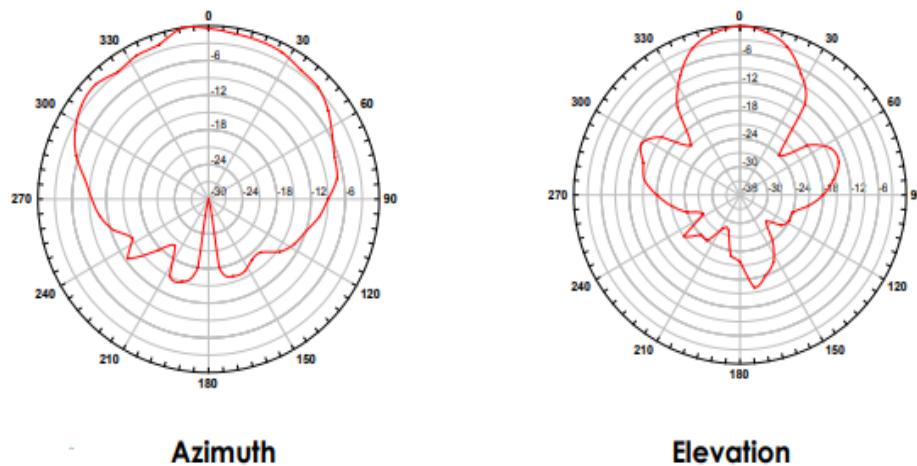


Figura 10. Patrón de radiación. (16)

En la Figura 10 se muestra el patrón de radiación del módulo radar, con un azimut de 70° y una elevación de 38° , el cual consta de 2 antenas receptoras y 2 antenas transmisoras.

El datasheet del módulo radar indica que la frecuencia de la señal de salida es proporcional a 70Hz cada m/s del componente radial de la velocidad que lleve el objetivo y la amplitud de la señal depende en gran parte de la distancia del objeto y la sección radar equivalente (RCS), la cual hace referencia a la reflectividad del objeto.

En la Figura 11, se muestra la señal emitida del módulo radar cuando no hay ningún obstáculo. En la Figura 12 se muestra la señal cuando hay una persona en movimiento y llega a una distancia de 1.5m, esta es la distancia máxima que se establece para el proyecto, esta medición se realizó con el fin de medir el voltaje mínimo que arrojaba el sensor radar frente a un obstáculo: en este caso una persona, para calcular la ganancia necesaria para el circuito acondicionamiento. En la Figura 13 se muestra la señal cuando una persona está en movimiento y llega a una distancia de 0.5m, esto se realizó con el fin de medir el comportamiento del módulo radar.

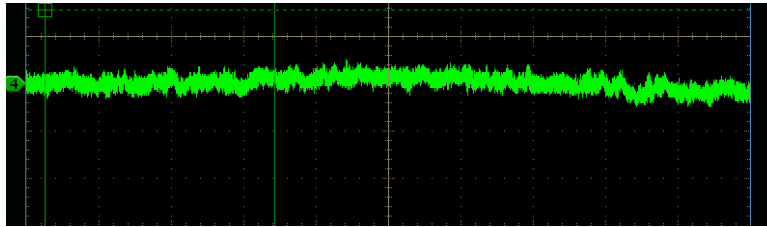


Figura 11 .señal sensor sin obstáculos

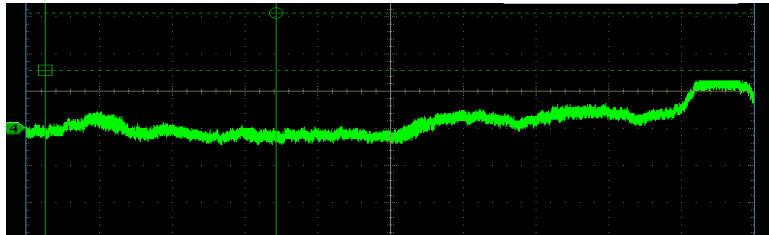


Figura 12. Señal del sensor con obstáculo 1.5m

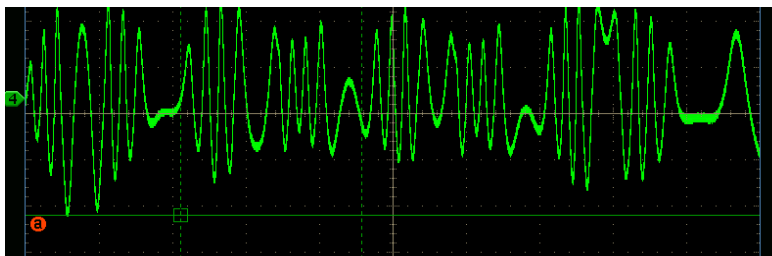


Figura 13.Señal del sensor con obstáculo 10cm

Se analizaron las señales en el osciloscopio, las cuales están representadas en las Figura 11, Figura 12 y Figura 13. La señal salida está en el orden de los micro voltios, el máximo valor de voltaje está en el orden de los 50mVpp, y el valor mínimo de voltaje está en el orden de los 600uV.

5.1.2 Hardware de adquisición

El hardware de adquisición integra todos los componentes necesarios para amplificar y muestras la señal de salida del módulo radar.

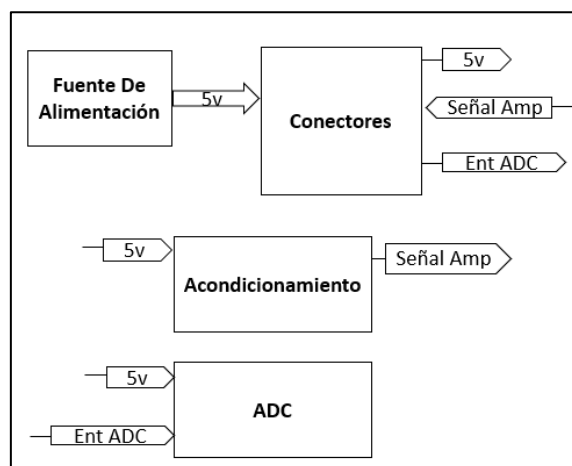


Figura 14.Diagrama de bloques hardware de adquisición

El hardware implementado permite en termino general, el acondicionamiento y digitalización de la señal del módulo radar. En la Figura 14 se muestra el hardware de adquisición, el cual puede dividirse en las siguientes etapas:

- Conectores: Terminales eléctricos para la conexión adecuada de la STEMLab Red-Pitaya y el módulo radar.
- Fuente de alimentación: Contiene un regulador conmutado para suministrar un voltaje de 5v, el cual es necesario para la alimentación de la Red-pitaya y el acondicionamiento de la señal.
- Acondicionamiento de la señal: Contiene los circuitos necesarios para amplificar la señal que emite el módulo radar, para llevarla a los niveles necesarios de la entrada del ADC
- ADC: Consiste en un convertidor análogo digital que ofrece la STEMLab Red-Pitaya

5.1.2.1 Convertidor análogo digital (ADC)

En la Figura 15 se muestra la representación de un sistema donde se usa un conversor análogo digital.

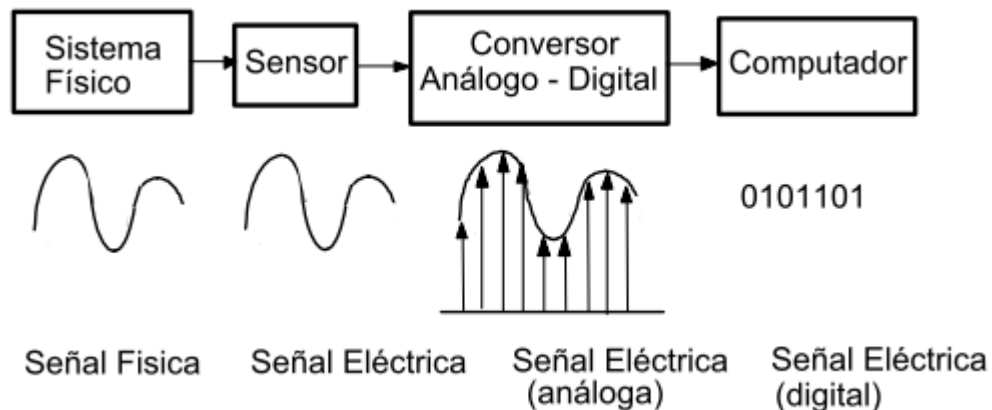


Figura 15.Representación ADC (conversor análogo digital) (17)

En la Figura 15 se muestra una representación general del uso de un ADC. El sistema consiste en un circuito electrónico encargado de tomar una señal física, la cual puede ser la temperatura, la humedad, la distancia etc. Esa señal física es captada por un sensor el cual la transforma en una señal analógica que básicamente es una señal eléctrica que va cambiando en el tiempo, pasa por el conversor análogo digital (ADC) el cual se encarga de muestrear la señal, es decir, se toman valores discretos en instantes de tiempo, lo que recibe el nombre de *sampling* (18), este proceso transforma la señal eléctrica en una señal digital (código binario), después esos valores son llevados a un computador o una tarjeta de adquisición para después ser analizados y hacer el procesamiento correspondiente. Un conversor análogo digital (ADC) matemáticamente es el equivalente a multiplicar la señal analógica por una secuencia de impulsos de periodo constante (18).

La STEMLab Red-Pitaya ofrece 2 tipos de ADC:

- Adc rápido: contiene 14 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima es de

125Msps, máximo valor de voltaje 1V.

- Adc lento: contiene 12 bits de resolución, frecuencia de muestreo máxima es de 100ksps, máximo valor de voltaje 3.5V.

Para el módulo HB100 se empleó el ADC lento el cual ofrece una frecuencia de muestreo máxima de 100ksps la fue adecuada para este proyecto porque la señal de salida del módulo radar no superaba los 385Hz. Este valor se calculó multiplicando la señal de salida del módulo HB100, el cual proporcional a 70Hz cada m/s y la velocidad promedio de una persona corriendo es de 5.5m/s. La velocidad del sistema radar móvil no superara la velocidad de una persona corriendo, pero todo el software estar dimensionado para la velocidad promedio de una persona corriendo, ya que a futuro se quiere implementar el sistema radar en una persona, además el ADC lento ofrece una interfaz de programación más agradable, tiene conector por desplazamiento del aislante (IDC), lo cual facilita la conexión del ADC a la etapa de acondicionamiento.

5.1.2.2 Acondicionamiento de señal

Consiste en un subsistema del hardware de adquisición. Se encarga de recibir la señal del módulo radar y amplificarla en un rango de 0 a 3.5v, ya que este es el valor máximo de voltaje que recibe el ADC de la tarjeta de adquisición.

El margen dinámico de la señal esta entre:

- Valor mínimo de voltaje de salida del módulo radar: 600 μ Vpp
- Valor máximo de voltaje de salida del módulo radar: 50mVpp

Estos valores se obtuvieron experimentalmente midiendo la señal que entregaba el módulo radar en el osciloscopio como se muestra en las Figura 11 y Figura 12.

El objetivo es convertir la señal del módulo radar en una señal dentro de un rango de 0 a 3.5V con un nivel de offset de 1.5V. Como la señal del módulo radar arroja un voltaje en el semiciclo positivo y en el semiciclo negativo y para no usar una fuente dual, se diseñó e implemento el siguiente circuito.

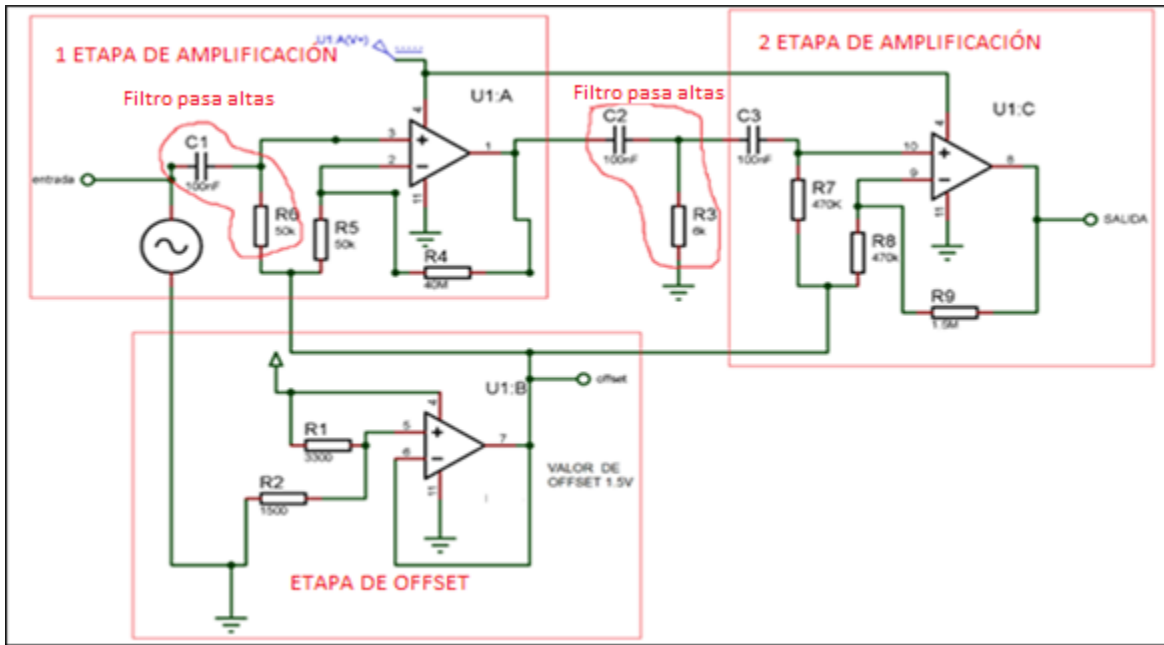


Figura 16 Circuito de acondicionamiento sensor radar

En Figura 16 se muestran las 2 etapas de amplificación y una etapa de offset hecha con un amplificador operacional con el fin de agregarle un nivel de voltaje a la señal.

Valor de offset

$$V_{offset} = \frac{v_i * R_2}{R_2 + R_1}$$

$V_i=5V$, $R_2=1.5k\Omega$, $R_1=3.3k\Omega$

$$V_{offset} = \frac{5V * 1.5k\Omega}{1.5k\Omega + 3.3k\Omega} = 1.5625V$$

Etapas de amplificación

$$V_{sal} = V_{entrada} * Ganancia$$

$$Ganancia = 1 + \frac{R_4}{X_c + R_6 + R_5}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi * f * C} \quad (19)$$

Donde:

f =frecuencia del sensor

C =Capacitancia.

- Etapa 1 de amplificación

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 14Hz * 100nF} = 113.68K\Omega$$

$$Ganancia = 1 + \frac{40M\Omega}{113.68K\Omega + 50K\Omega + 50K\Omega} = 188$$

$$V_{sal} = 1mV * 187 = 0.187V$$

- Etapa 2 de amplificación

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 14Hz * 100nF} = 113.68K\Omega$$

$$Ganancia = 1 + \frac{1.5M\Omega}{113.68K\Omega + 470K\Omega + 470K\Omega} = 2.4$$

$$V_{sal} = 0.187V * 2.4 = 0.44V$$

Los cálculos hechos anteriormente, se realizaron con el valor de voltaje de la señal de salida del módulo radar, cuando una persona se estaba moviendo en dirección al radar y esta estaba a una distancia de 2m, el valor aproximado de la señal era de 1mV.

El amplificador operacional utilizado es un MC332020 sus características son (20):

- Voltaje de alimentación (+1.8 V and Ground to +12 V and Ground)
- Máxima salida de corrientes (ISC = 80 mA, Typ)
- Corriente de alimentación (ID = 0.9 mA, Typ)
- Temperatura de operación (-40° to +105°C and -55° to +125°C)
- Ancho de banda = 2.2 MHz
- Configuración de operación *rail to rail*

Los amplificadores operacionales convencionales, como un 741, tienen un rango dinámico que no alcanza los valores máximos correspondientes a la fuente de alimentación. Por lo tanto, cuando se alimenta un operacional de este tipo con una fuente simétrica de -12 + 12 V la señal de salida no gira entre -12 y + 12 V, porque siempre hay una disminución (21). Como se muestra en la Figura 17 El voltaje de alimentación del amplificador es de 12V, pero la señal se salida del amplificador solo llega a un valor de 11.4V

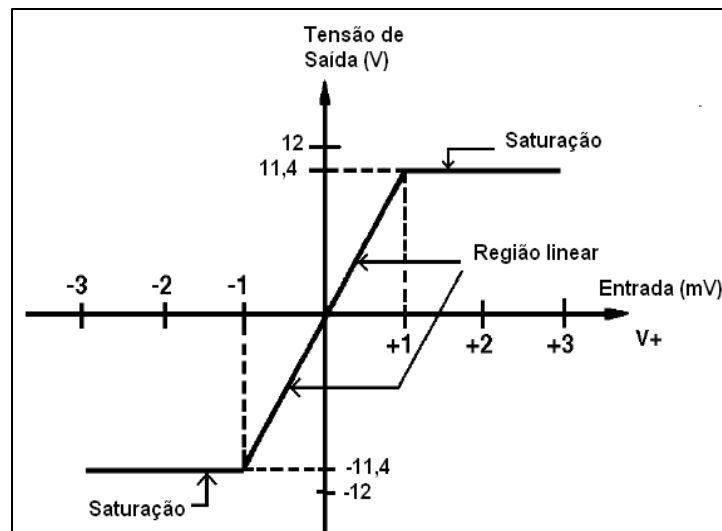


Figura 17. Salida de un amplificador común (21)

Para no tener estas pérdidas se utilizan amplificadores con una configuración línea a línea (*rail to rail*). Ya que la señal de salida puede llegar hasta los valores de la línea de alimentación, como se muestra en la Figura 18, la señal de salida del amplificador alcanza el mismo rango de voltaje de la

alimentación. Los operacionales utilizados en el proyecto no va a -12v a +12v sino a GND a +5v pero que el concepto de rail to rail se mantiene

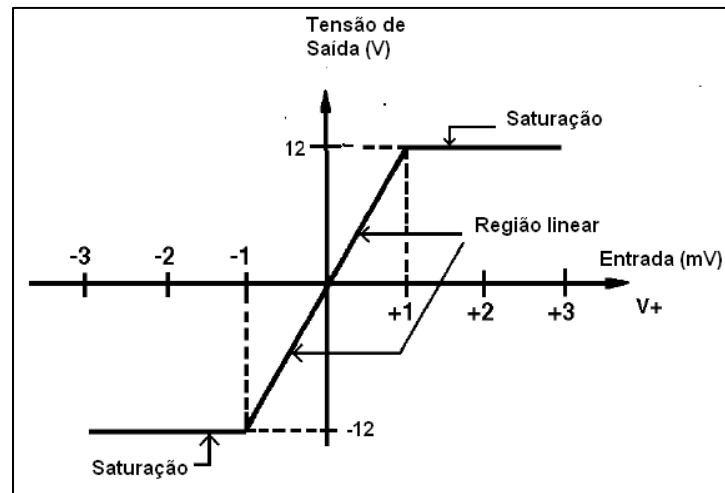


Figura 18. Salida de un amplificador rail to rail (21)

5.1.2.3 Fuente de Alimentación

En términos generales una fuente de alimentación es un sistema que proporciona un valor de tensión adecuado para el funcionamiento de cualquier dispositivo. La fuente se encarga de convertir la entrada de tensión alterna de la red en una tensión continua y constante (22). Debido a que la fuente de alimentación depende de la red eléctrica, se limita en aplicaciones que necesiten sistemas móviles, porque se necesitan cables que siempre estén conectados a la red; entre más se alejen los sistemas móviles, la longitud del cable es mayor. Para evitar ese inconveniente en esta etapa se han migrado a las baterías.

La batería es un dispositivo formado por varias celdas capaces de almacenar energía eléctrica para su uso posterior y proporcionan una alimentación que no depende de la red eléctrica, lo cual es necesario en el marco del proyecto debido a que se necesita que el sistema radar móvil sea autónomo.

Para elegir la batería adecuada, lo primero que se analiza es el máximo valor de voltaje y corriente necesarios para suplir con las necesidades de los dos sistemas.

El corazón del sistema es una STEMLab Red Pitaya; ésta requiere de una alimentación de 5V~1.5A., por lo cual, la batería debe suministrar el voltaje y la corriente necesarios para alimentar la tarjeta y el sensor.

Para las etapas de acondicionamiento se utilizaron componentes electrónicos activos como los amplificadores operacionales y componentes electrónicos pasivos para ajustar la ganancia de los amplificadores. Los amplificadores operacionales requieren un voltaje de alimentación mayor al voltaje de salida que arrojan.

La otra etapa para tener en cuenta es la comunicación con el computador; se utilizó una vía inalámbrica a través de dongle Wi-Fi. al momento de realizar el diseño, se consultaron hojas de datos por lo cual se estimó un consumo de 50mA para el módulo inalámbrico.

En la Tabla 2 se observan los componentes y el consumo aproximado para el sistema radar Doppler.

Tabla 2. Bloques de función y consumo Radar Doppler

Componente	Consumo
Red Pitaya	5V ~ 1.5A
Comunicación PC	5V ~ 50mA
Sensor Radar Doppler	5V ~ 60mA
Acondicionamiento Sensor Doppler	5V ~ 100mA
Futuras Expansiones	5V~200mA
Consumo total	5v~ 1.91A

Observando la tabla 1, el máximo valor de voltaje en los sistemas es 5V y el consumo de corriente total del sistema es aproximadamente 1.91A. De acuerdo con lo anterior, se requirió una batería mínimo de 5V~2A. Para este proyecto se utilizó un Power bank que contiene 2 salidas 5V, corriente de salida 2A y una capacidad de 6400mAh.

5.1.3 Sistema de Visualizacion

En la Figura 19 se muestra el sistema de visualizacion. El sistema consiste de 3 led de color verde, azul y amarillo cada led representa un rango de distancia, el led verde una distancia de 1m hasta 1.5m, el led azul una distancia de 50cm hasta 1m y el led amarillo una distancia de 5cm a 0.5m, esto se realizó con el fin de tener un visualizacion de la distancia en la que se encuentra el blanco.

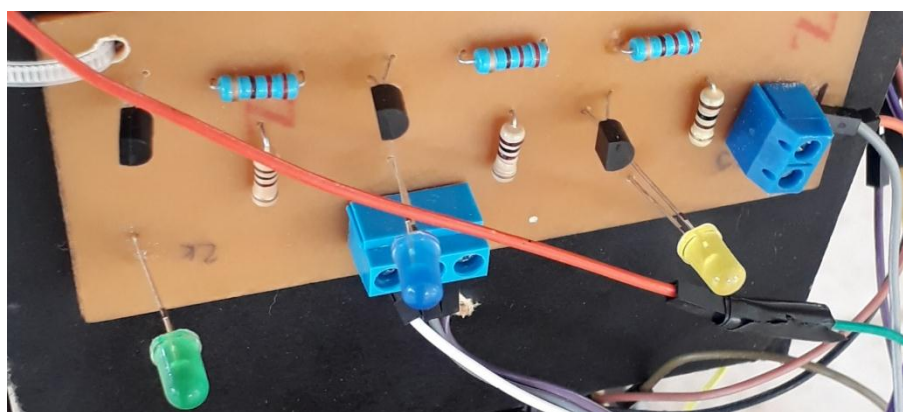


Figura 19. Sistema visual de distancia

5.2 Software

El objetivo principal de esta etapa consiste en tomar los datos ya digitalizados, hacer el procesamiento de la señal, y mostrar con una visualizacion de leds la distancia aproximada donde se encuentra el obstáculo.

La tarjeta de adquisición es una STEMLab Red pitaya. Esta tarjeta es un sistema electrónico de código abierto para aplicaciones de control y medición, con el tamaño de una tarjeta de crédito. Tiene similitudes con sistemas como Raspberry Pi, con un sistema operativo basado en Linux y una comunidad de usuarios que desarrollan y comparten sus aplicaciones. Sin embargo, la Red Pitaya tiene dos factores diferenciales:

- Hardware dedicado para la adquisición y generación de señales analógicas.
- CPU con una FPGA programable para realizar tareas de procesamiento digital de señales.

Para realizar el procesamiento de una señal radar es importante contar con un ADC y un DAC de altas resoluciones para minimizar el error al retorno de la señal radar; la Red Pitaya cuenta hasta con 14 Bits de resolución para estos conversores. Otro factor influyente es la velocidad del procesamiento de los datos, dado que Red Pitaya trabaja también con FPGA, es posible operar las interfaces seriales y paralelas al mismo tiempo que se realiza el procesamiento de la señal radar, para trabajo en tiempo real. Por último, la Red Pitaya cuenta con una memoria hasta de 512 MB de RAM (23). En la

Figura 20 se muestra la tarjeta de procesamiento descrita.

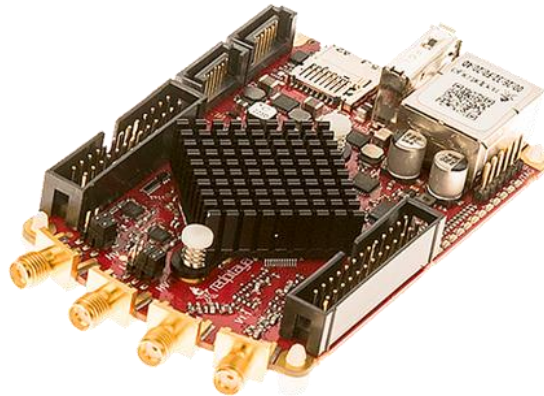


Figura 20. STEMLab Red Pitaya.

Como se explicó anteriormente la tarjeta de adquisición es la STEMLab Red pitaya. Esta tarjeta contiene un compilador nativo en lenguaje C, básicamente la computadora donde el compilador funciona, es llamada el Host, y la computadora en donde los programas se ejecutan se llama objetivo, entonces cuando el host y objetivo son el mismo tipo de máquina, la compilación es nativa (24), para utilizar el compilador nativo de la tarjeta solo hay que cargarle el código en C, que se puede escribir en un editor de texto como Notepad++, el sistema compila el archivo y si hay algún error le muestra un mensaje de advertencia. Pero esta forma de programación no es la más adecuada por que toma mucho más tiempo para compilar programas complejos y tiene un entorno de desarrollo poco amigable con el usuario, por tal motivo se migró a una compilación cruzada que es cuando el host y el objetivo son diferentes. Básicamente consistió en buscar un entorno de desarrollo con un compilador en C, para ser instalado en un computador de escritorio o un portátil y realizar en el entorno de desarrollo el código en lenguaje C, para después ser transferido y ejecutado en la Red pitaya.

Para la compilación cruzada se usó un entorno de desarrollo Eclipse con un compilador en C, se instaló en una máquina virtual con sistema operativo Linux con una distribución debían en un computador de escritorio y en un portátil. El código de la aplicación se realizó en C, la comunicación con la tarjeta se realiza en por medio de un dongle wifi con una comunicación SSH utilizando MobaXterm como herramienta de Windows para realizar funciones en Linux. La comunicación sólo se utiliza al momento de programar y configurar la tarjeta. No se requiere en la ejecución del programa. En la Figura 21 se muestra la representación gráfica de las herramientas de programación y comunicación



Figura 21.grafico herramienta de programación y comunicación

Se creó un blog como parte del proyecto con el fin de no perder la información que se realizó sobre la Red pitaya, en este blog se encuentra la información de cómo establecer comunicación con la tarjeta, como programar en C y cómo realizar la compilación cruzada. Este blog fue creado como una actividad del proyecto de pasantía. En la referencia (23) se encuentra la URL de blog.

El código de programación se divide en 5 bloques:

- Timer: Controla el tiempo de adquisición de la señal.
- ADC: digitalización de la señal en valores de voltaje.
- Filtrado: Consiste en recibir la señal amplificada y muestreada del módulo radar y disminuir el ruido que tiene la señal.
- Procesamiento: consiste en utilizar diferentes técnicas, para estimar la distancia de un obstáculo.
- Visualización de distancia: consiste en prender leds de diferentes colores para indicar la distancia donde se encuentra el obstáculo.

En la Figura 22 se muestra un diagrama de flujo de alto nivel de la programación que se implementó en el sistema radar.

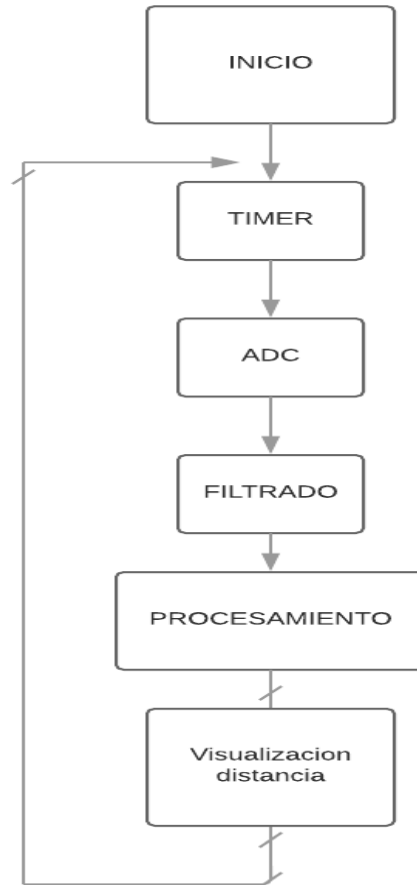


Figura 22. Diagrama de flujo del software

5.2.1 Timer

Para la digitalización correcta de la señal se debe tener en cuenta el teorema de Nyquist. Es un teorema de gran relevancia en la adquisición de señales, establece una condición necesaria y suficiente para la reconstrucción en el dominio temporal, de una señal adquirida: el criterio indica que la frecuencia de muestreo debe ser mayor de 2 veces que la frecuencia más alta de la señal que se quiere reconstruir (25).

$$F_s > 2F_m$$

Para conocer cuál era la frecuencia de muestreo aplicada por la función Timer, se debió conocer la frecuencia de la señal a muestrear. La señal proviene de un radar onda continua (CW) que consiste en un módulo HB100. Como se explicó anteriormente la señal de salida del módulo radar va cambiando su frecuencia dependiendo la velocidad relativa entre el obstáculo y el sensor radar, la amplitud cambia dependiendo de la reflectividad y la distancia entre el obstáculo y el sensor radar. El sensor radar tiene una salida IF el cual arroja una señal que cambia su frecuencia 70hz cada m/s, por ejemplo, si el obstáculo lleva una velocidad de 1m/s la señal de salida del módulo radar tendrá una frecuencia de 70Hz, si la velocidad del obstáculo es de 5m/s la señal de salida del módulo radar tendrá una frecuencia de 350Hz y así sucesivamente. Como la señal a muestrear depende de la velocidad se calculó la velocidad del sistema radar móvil utilizando la siguiente formula:

$$V=X/T$$

Donde:

V=velocidad

X=distancia recorrida

T=tiempo transcurrido

Se ubico el sistema radar móvil a la distancia máxima de detección que es 1.5m, se puso en marcha y con un cronometro se tomó el tiempo que duró el sistema en recorrer la distancia establecida, el tiempo fue aproximadamente 7 segundos. Reemplazados los valores en la formula obtenemos:

$$V=1.5m / 7seg \Rightarrow V= 0.2m/s$$

El sistema radar móvil esta dimensionado para detectar personas en movimiento, como la velocidad promedio de una persona corriendo es de aproximadamente 5.5m/s, la máxima señal de salida del módulo radar tendrá una frecuencia de aproximadamente de 385Hz.

$$Frecuencia\ de\ salida\ hb100 = 70Hz * 5.5 = 385\ Hz$$

Para cumplir el teorema de Nyquist la frecuencia de muestreo debería ser mayor de 760Hz, se estableció una frecuencia de muestreo de 10KHz, con el fin de obtener 26 muestras por cada ciclo de periodo de la máxima señal a digitalizar para realizar una reconstrucción completa de la señal.

Para garantizar que la frecuencia de muestreo sea de 10KHz. Primero se realizó una función llamada tiempoUs ver Figura 23.

```
long long int tiempoUs(void){// funcion para adquirir milsegundos
long long int timestamp_usec;
struct timeval timer_usec;
    if (!gettimeofday(&timer_usec, NULL)) {
        timestamp_usec = (( timer_usec.tv_sec)*1000000 +timer_usec.tv_usec);
    }
    else {
        timestamp_usec = -1;
    }
    return timestamp_usec;
}
```

Figura 23. Función TiempoUs

En la Figura 23 se muestra el código en C de la función tiempoUs. la cual devuelve el valor numérico de los microsegundos transcurridos desde el 1 de enero de 1976 hasta la fecha actual, Esto se realizó con el fin de tener el valor numérico del tiempo de ejecución.

5.2.2 ADC

El segundo paso para garantizar una frecuencia de muestre de 1KHz, fue la ejecución de la función ADC (conversor análogo digital), se utilizó para digitalizar la señal amplificada del módulo HB100.

En la Figura 24, se muestra el código de la función ADC, cabe mencionar que esta función hace parte de las API (*Application Programming Interface*) que entrega el Red pitaya

```
float adc(void){  
  
    rp_AIpinGetValue(0, &valoradc);  
  
    return valoradc;  
}
```

Figura 24. Función ADC

Por último, se realizó la programación utilizando las funciones tiempoUs y ADC, para garantizar una frecuencia de muestreo de 10KHz. Ver Figura 25

```
while(1){  
    tiempoRef2=tiempoUs();  
    if((tiempoRef2-tiempoRef1)>PERIODO_MUESTREO){  
        // condicion para frecuencia de muestreo  
        tiempoRef1=tiempoUs();  
        vectormuestra[conteoMuestras]=adc();  
        conteoMuestras++;  
        if(conteoMuestras>=NUMERO_MUESTRAS){  
            // condicion para realizar procesamiento  
            procesamiento();  
            conteoMuestras=0;  
        }  
    }  
}
```

Figura 25. Implementación función Timer y función ADC

En la Figura 25 se muestra el código en C implementado para realizar el muestreo de la señal amplificada del módulo radar con una frecuencia de muestreo de 10KHz. En la primera parte del código se utilizó la función tiempoUs, como se explicó anteriormente esta función retorna un valor de microsegundos muy grande, por tal motivo ese valor se almacena en una variable Long int llamada tiempoRef2, para determinar si ya transcurrieron 100ms(10Khz) se realizó una condición, si la diferencias entre los tiempos de referencia es mayor que el PERIODO_MUESTREO (100ms), asígnele a tiempoRef1 el valor numérico de los microsegundos transcurridos. Para aclarar los tiempos de referencia nunca serán igual, siempre pasara un tiempo entre la ejecución de cada línea de código, ese tiempo depende de la velocidad de reloj de la tarjeta.

La programación se realizó con esta lógica para garantizar que pasado 100ms (10KHz) se llame a la función ADC, la cual tomara el valor de voltaje que tenga la señal en ese instante de tiempo, guardarlo en el primer campo de un vector de 3000 muestras, realizar un corrimiento al siguiente campo del vector por medio de un contador (conteoMuestras) que incrementara en +1 su valor actual, esperar que transcurran otros 100ms (10KHz), obtener de nuevo el valor de voltaje de la señal y guardarlo en el campo del vector que indique el contador y realizar el mismo procedimiento hasta llenar todos los campo del vector, después se realiza el procesamiento sobre el bloque de

3000 muestras del ADC, se reinicia el contador (conteoMuestras) a un valor de 0 y se realiza de nuevo todo. Este procedimiento se realiza en un ciclo infinito.

El tamaño del bloque de datos que se tome afecta la tasa de actualización de la información, por lo que un vector de 3000 muestras es un valor que genera un buen compromiso entre tiempo de actualización de la información (300 ms) y una cantidad de datos adecuada para realizar el procesamiento. El tiempo de actualización de la información se calculó usando la siguiente formula:

$$\text{Tiempo de adquisición} = \text{tiempo de muestreo} * \text{número de muestras}$$

$$\text{Tiempo de adquisición} = 100\mu\text{s} * 3000 = 300\text{ms}$$

La señal muestreada viene con ruido proveniente del sensor, además se está amplificando la señal lo cual amplifica el ruido. Para el proyecto el ruido generaba falsas detecciones, por tal motivo fue necesario implementar una etapa de filtrado digital

5.2.3 Filtro Digital

Un filtro es un proceso computacional o algoritmo mediante el cual una señal digital (secuencia de muestras) es transformada en una segunda secuencia de muestras o señal digital de salida (26). Básicamente es una operación matemática que toma una secuencia de números y la modifica produciendo otra secuencia de números con el objetivo de resaltar o atenuar ciertas características (27).



Figura 26. diagrama de bloques de un filtro digital

Para este proyecto se realizó un filtro digital FIR (Finite impulse response), con el fin de reducir el ruido generado por los amplificadores y la fuente de alimentación, este ruido está en frecuencias superiores a la señal que emite el sensor radar.

Los filtros digitales de respuesta impulso finita (Finite Impulse Response) se basan en obtener la salida a partir, exclusivamente, de las entradas actuales y anteriores (28). Así, para un filtro de N longitud la fórmula es la siguiente.

$$y_{(n)} = b_0x(n) + b_1x(n - 1) + \dots + b_Nx(n - N + 1) = \sum_{k=0}^{N-1} b_kx(n - K)$$

Donde los $\{b_k\}$ son los coeficientes del filtro. Para elegir el orden de filtro y el enventanado, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Ancho de la banda pasante
- Rizado en la banda pasante
- Ancho de la banda de transición
- Ancho de la banda atenuada
- Rizado en la banda atenuada

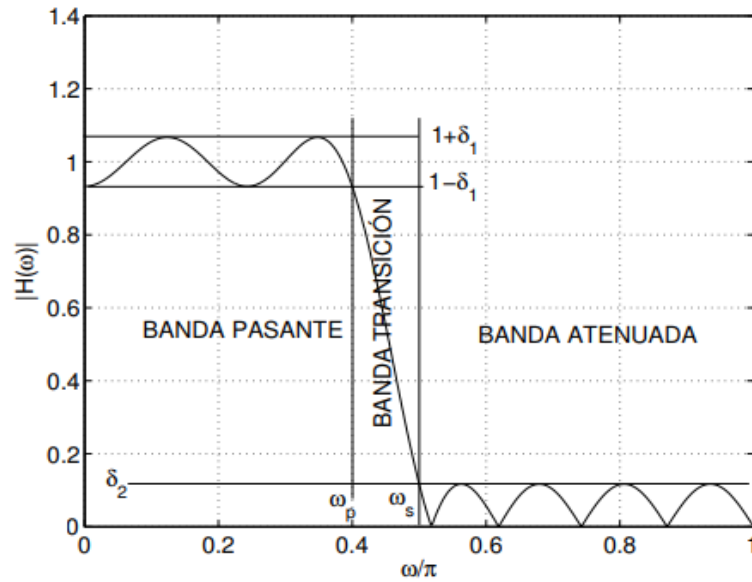


Figura 27. Respuesta en frecuencia de un filtro digital (29).

En la Figura 27 muestra los parámetros para escoger el tipo de enventanado. La técnica de ventana o enventanado se basa en seleccionar la respuesta a impulso $h[n]$ como una versión truncada de la respuesta a impulso $h[n]$ de un filtro ideal con respuesta frecuencial $H(F)$ (30). Las ventanas más usadas para filtro digitales FIR son:

1. Blackman window
2. Hamming window
3. Rectangular window
4. Triangular window or Bartlett window
5. Hanning window
6. Kaiser window

El enventanado utilizado en el presente proyecto es ventana Hamming. El diseño de un filtro FIR utilizando una ventana hamming es estable en comparación con Técnicas de ventanas rectangulares y Hanning. Ver Figura 28

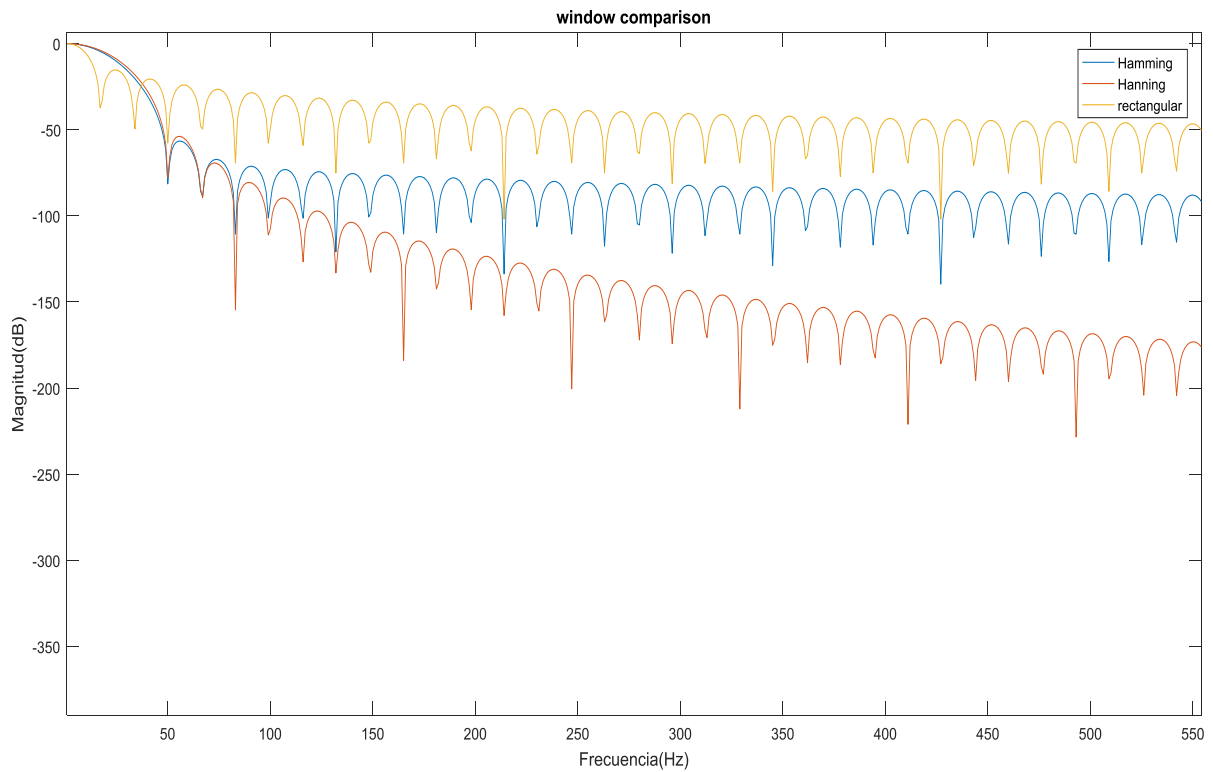


Figura 28. Respuesta en el tiempo ventanas Hamming, Hanning, Rectangular.

En la Figura 28 se muestra la respuesta en frecuencia de 3 ventadas diferentes, la azul corresponde a la Hamming, la roja a la Hanning, y la naranja a la rectangular. La ventana Hamming tiene fase lineal en comparación con las ventanas rectangular y Hanning. Las ondulaciones en la banda de paso son menos en Hamming en comparación con la rectangular y la Hanning (31).

Dadas las especificaciones del filtro, hay que elegir el largo de la respuesta al impulso M (el número de coeficientes de filtro), la frecuencia de corte y la ventana. La elección debe ser tal que el filtro cumpla los requerimientos y la cantidad de coeficientes sea lo menor posible (32).

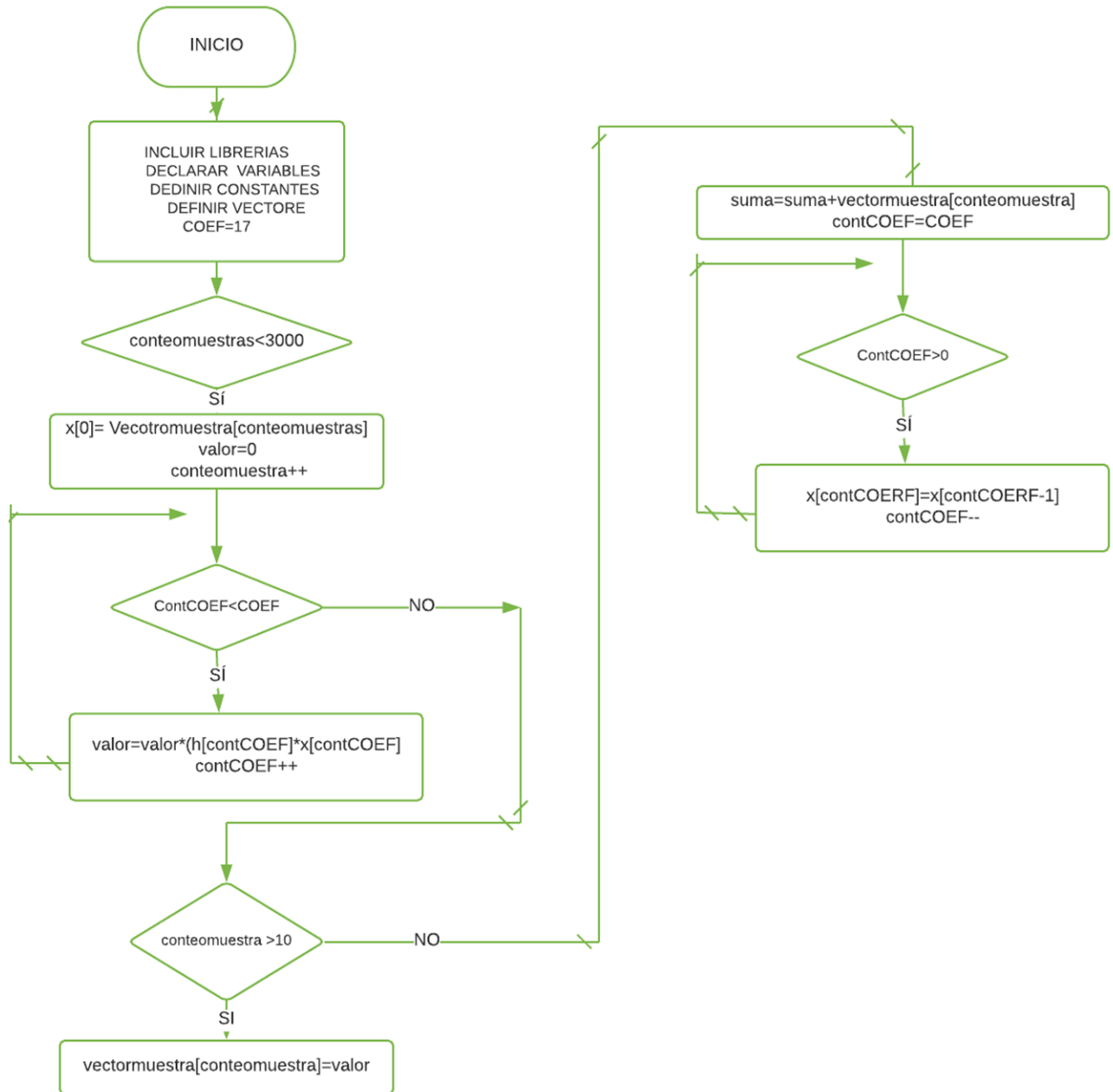


Figura 29. Diagrama de flujo del filtro FIR orden 17

En la Figura 29 se muestra el diagrama de flujo del filtro digital FIR. Básicamente consiste en implementar la fórmula de un filtro digital FIR la cual se mencionó anteriormente. Para calcular los coeficientes del filtro se utilizó la herramienta *fdatool* de Matlab. Para este sistema se calcularon los coeficientes de Orden 17 ya que se realizó una simulación con la señal del radar y se encontró que era un buen balance entre calidad de la señal de salida y procesamiento. Ver Figura 30.

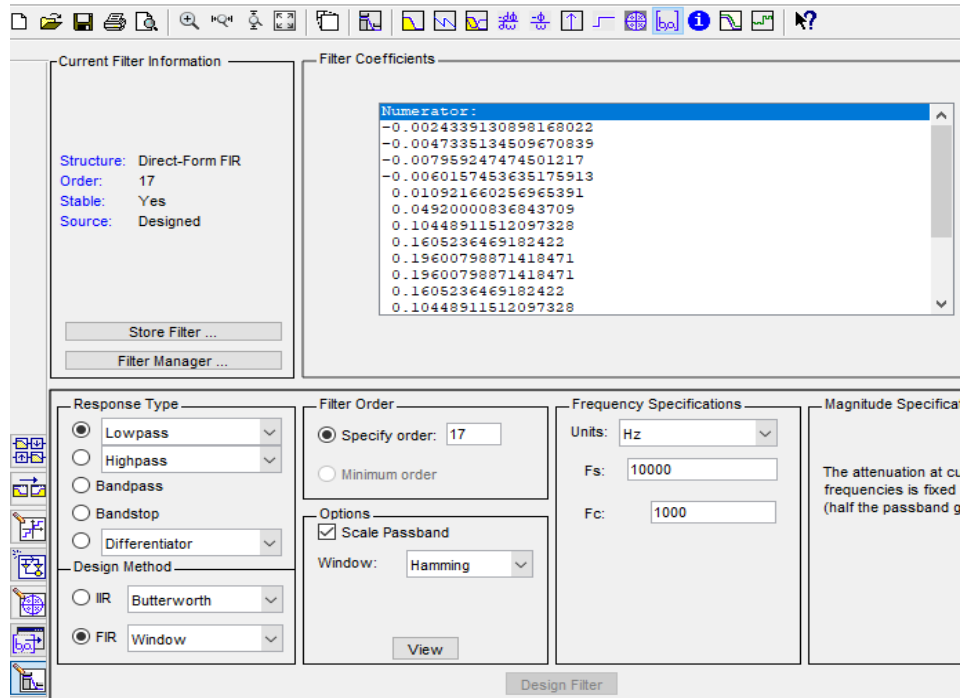


Figura 30. Herramienta de Matlab fdatool

En la Figura 30 se muestra la herramienta **fdatool**, la cual se utilizó para calcular los coeficientes del filtro, se especificó un filtro pasabajas FIR de orden 17 por método de enventanado Hamming, con frecuencia de muestreo de 10KHz y con una frecuencia de corte de 1KHz, la cual indica la frecuencia donde el filtro debe empezar atenuar. En la parte superior se muestra el valor de los coeficientes.

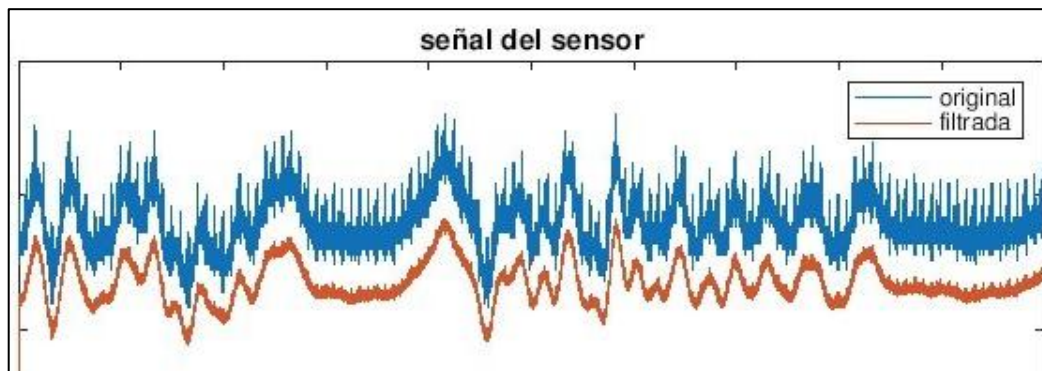


Figura 31. Visualización ADC Y Filtro digital

En la Figura 31 se visualiza la respuesta del filtro FIR. El uso de un filtro digital es muy importante para este proyecto porque la señal de salida del sensor radar viene con ruido y como se está pasando por una etapa de amplificación, se amplifica ese ruido. Aun con el filtro digital implementado la señal tiene un poco de ruido, pero para nuestra aplicación se encuentra en valores aceptables. Teniendo la señal filtrada el siguiente paso es utilizar la información del sensor para detectar blancos en ciertos rangos de distancia, para esto se realiza una etapa de procesamiento.

5.2.4 Procesamiento

Filtrada la señal y guardado los valores en un vector de 3000 muestras, el procesamiento básicamente consistió en comparar cada valor del vector, contra un valor de umbral, si el valor de la señal superaba el umbral incrementaba un contador, dependiendo el valor del contador se estimaba en que rango de distancia se encontraba el obstáculo. En la Figura 32 se muestra el diagrama de flujo de la etapa de procesamiento.

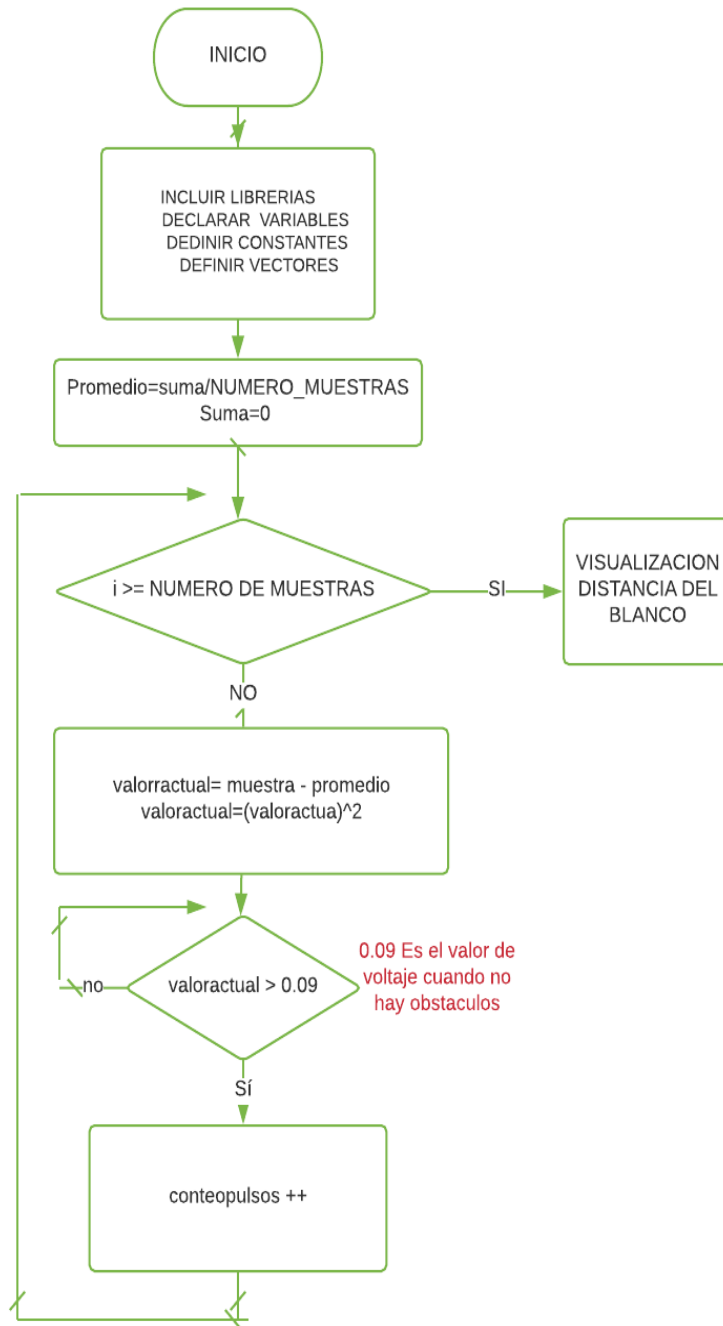


Figura 32. Diagrama de flujo etapa de procesamiento

En la Figura 32 se muestra el diagrama de flujo de la etapa de procesamiento, esta etapa consiste en:

- Realizar un promedio de las 3000 muestras de la señal filtrada con el fin de quitar el nivel de offset para obtener los componentes positivos y negativos de la señal amplificada del módulo radar, como se muestra en el recuadro 3 del diagrama de flujo, recordar que en la etapa de acondicionamiento se agregó un nivel de offset a la señal para no dañar el ADC, el cual no puede recibir voltajes negativos.
- Realizar una condición para garantizar que solo el proceso solo se hará sobre el bloque de función de las 3000 filtradas, como se muestra en el recuadro 4 del diagrama de flujo.
- Restar el promedio a cada valor de la señal filtrada y el resultado de cada valor elevarlo al cuadrado para no trabajar con valores negativos como se muestra en el recuadro 5 del diagrama de flujo.
- Establecer un valor de umbral y compararlo con los valores elevados al cuadrado, como se muestra en el recuadro 6 del diagrama de flujo. El valor de umbral es de 0.09, este valor se escogió graficando los valores elevados al cuadrado en Matlab de la señal cuando no había ningún obstáculo.
- Si el valor elevado al cuadrado supero el valor de umbra incrementaba un contador. como se muestra en el recuadro 7 del diagrama de flujo. Esta parte es muy importante porque la señal de salida del módulo radar cambia su amplitud dependiendo la distancia en la que se encuentre el obstáculo, entre más cerca este el obstáculo del sensor radar mayor será su amplitud.

Si el contador tiene un valor entre 3000 y 2000 significa que el obstáculo está a un distancia entre 0m y 0.5m, si el contador tiene un valor menor a 2000 y mayor a 1200 significa que el obstáculo está a una distancia entre 0.6m a 1m y si el contador tiene un valor entre menor a 1200 y mayor a 400 significa que el obstáculo está a un distancia entre 1.1m a 1.5m y si el valor es menor a 400 el obstáculo esta fuera del rango de medida.

5.2.5 Visualización de distancia

En la Figura 33 Se muestra el diagrama de flujo con el que se realiza el encendido de los Leds, consiste en 3 leds de diferentes color, como se explicó anteriormente se tiene 3 rangos de medida, cuando el obstáculo este en un rango de 1.5m a 1.1m se enciende un led verde , cuando este en un rango de 1m a 0.6m se enciende los leds verde y azul y si el obstáculo se encuentra a una distancia menor de enciende los leds verde, azul y amarillo.

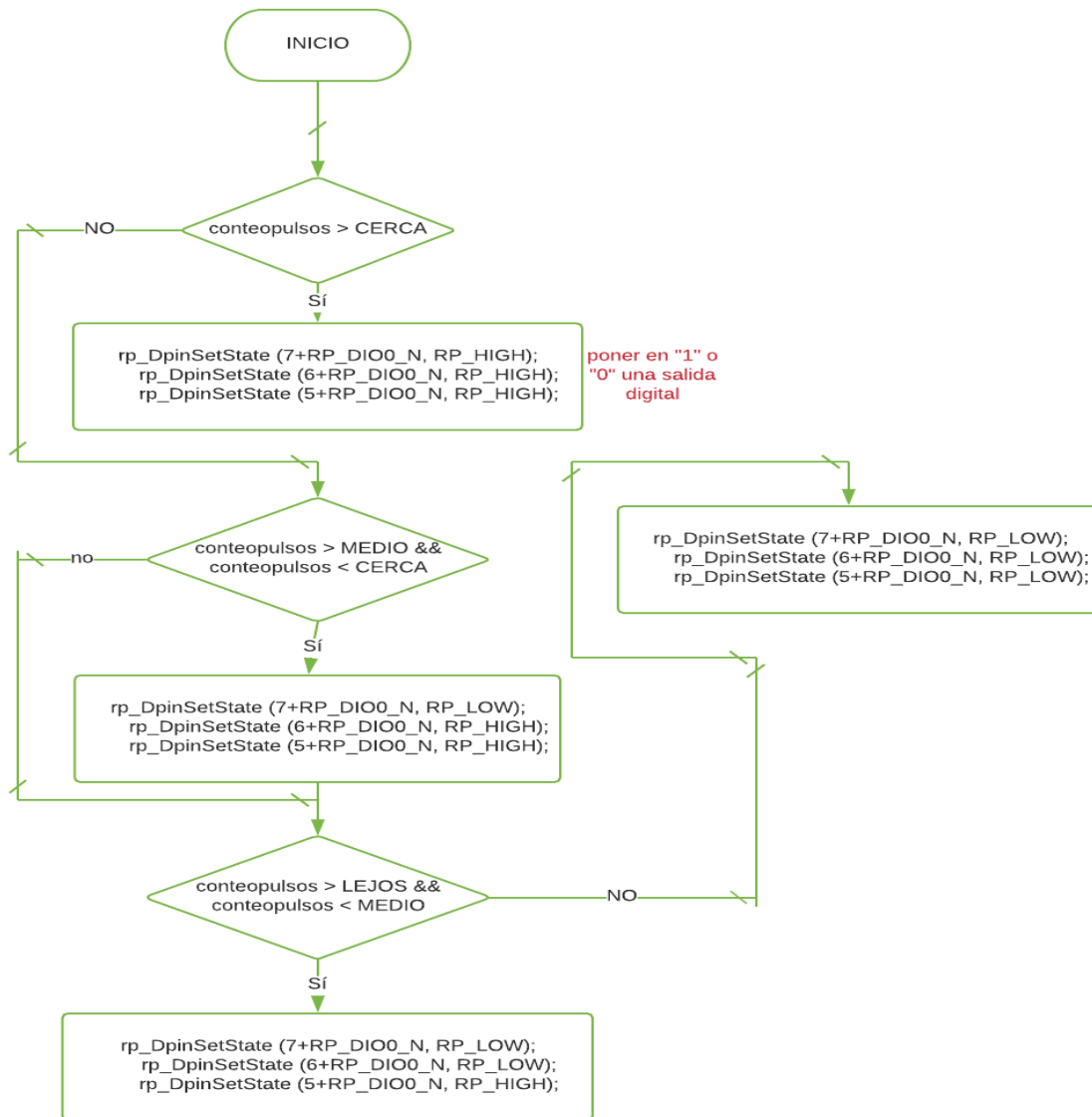


Figura 33. Diagrama de flujo etapa de Visualizacion

Todos los pasos descritos hasta el momento se fueron realizados con el radar estáticos, pero como el objetivo principal del proyecto consistía en la implementación de un sistema radar móvil para la detección de obstáculo fue necesario implementar una plataforma móvil.

5.3 Plataforma móvil

La plataforma móvil es un conjunto de elementos los cuales se encargaron del desplazamiento del sistema radar, esto se realizó con el fin analizar el comportamiento del sistema radar cuando se encontraba en movimiento. La plataforma móvil estaba conformada por 5 elementos los cuales eran:

- Una plataforma robótica todo terreno 4x4
- 2 módulos puentes H L298N
- Un módulo inalámbrico bluetooth
- Una tarjeta de programación Arduino
- Una aplicación Android

5.3.1 Plataforma Robótica

Para el proyecto la plataforma robótica debe ser lo suficientemente grande para soportar el peso de sistemas de acondicionamiento, el sensor radar, la STEMLab Red pitaya y las fuentes de alimentación, por tal motivo se pidió un préstamo a la universidad de los llanos la cual contaban con unas plataformas robóticas lo suficientemente grandes. La Plataforma Robótica todo terreno 4x4. Cuenta con:

- Estructura en aluminio y paneles lexan,
- 4 llantas de 12cm superficie de caucho, rin plástico.
- 4 motorreductores de 18Kg, con Encoder.
- Largo: 28cm
- Ancho: 32cm
- alto: 12cm (33)

Ver Figura 34.



Figura 34. Plataforma móvil

En la Figura 34 se muestra la plataforma robótica, como se mencionó anteriormente esta plataforma cuenta con 4 motorreductores totalmente independiente, por tal motivo se utilizaron módulos puentes H para controlar el sentido de giro de los motores, cada módulo puente H puede controlar 2 motores, en el proyecto se utilizaron 2 módulo puente H.

5.3.2 Puente H L298N

El módulo puente H L298N es una tarjeta para el control de motores de corriente directa, motores a pasos, solenoides y en general cualquier otra carga inductiva. La tarjeta está construida en torno al circuito integrado L298N, el cual dispone en su interior de 2 puentes H independientes con capacidad de conducir 2 amperios constantes o 4 amperios en picos no repetitivos. Esta tarjeta es ideal para controlar motores en pequeños robots como seguidores de línea, zumbos, robots de laberinto, etc. (34) ver Figura 35.

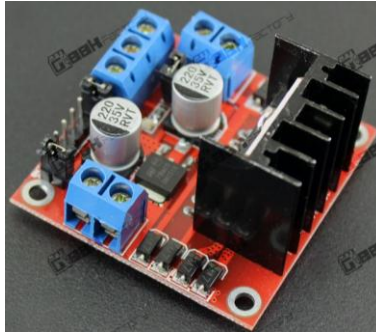


Figura 35. Módulo Puente H L298N (34)

En la Figura 35 se muestra un módulo puente H L298N, los puentes H controlan el sentido de giro de los motores por medio de unos pines de habilitación, dependiendo el pulso que se le envíe a los pines, indica el sentido de giro de los motores, en pocas palabras se necesitó una tarjeta de programación que genera un código binario, para este proyecto se implementó el código en una tarjeta Arduino Uno.

5.3.3 Tarjeta de programación Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. El microcontrolador de la placa se programa usando el “*Arduino Programming Language*” (basado en Wiring) y el “*Arduino Development Environment*” (35). El Arduino se utilizó exclusivamente para controlar los motores y gestionar la comunicación bluetooth ver Figura 36



Figura 36. Tarjeta de programación Arduino uno (35)

Para el control de giro de los motores en este proyecto se utilizó esta tarjeta, porque tiene una plataforma de programación muy fácil de usar y en la cual se tiene familiarización. No se utilizó la Red pitaya para tener completamente aislados los sistemas de la plataforma móvil y el sistema radar. Además, la red pitaya se encargaba de la adquisición y procesamiento de la señal del módulo radar, introducirle otra tarea incrementaría la carga computacional y afectaría el tiempo de adquisición y ejecución del sistema radar.

Después de realizar la programación del control de giro de los motores de la plataforma robótica, se realizó una App en Android para controlar la dirección de movimiento de la plataforma móvil.

5.3.4 Aplicación Android (App)

En la Figura 37 se muestra la App realizada para este proyecto la cual consta de un botón de encendido, otro de apagado, y cuatro botones que indican la dirección en la que se quiere llevar la plataforma móvil, ADELANTE, ATRÁS, DERECHA e IZQUIERDA y tiene un botón en la parte

superior para comunicarse con el módulo inalámbrico bluetooth, el cual a su vez se comunica con la tarjeta Arduino, por lo tanto, sirve como un puente de comunicación entre la App y la tarjeta Arduino. El módulo inalámbrico utilizado fue un HC06.



Figura 37. Aplicación Android

5.3.5 Módulo Bluetooth

En la Figura 38 se muestra el módulo bluetooth HC06 el cual tiene unos puerto Tx y Rx, que permitió realizar comunicación inalámbrica a distancia de 30 metros máximo, se puede configurar por medio de comandos AT, los cuales se envían por un puerto serial, trabajan a un voltaje de 3.3v, por lo regular estos módulo son para aplicaciones con microcontroladores, PIC o tarjeta Arduino.



Figura 38. Módulo inalámbrico Bluetooth HC06 (36)

Características:

- Modo esclavo (Solo puede operar en este modo)
- Puede configurarse mediante comandos AT (Deben escribirse en mayúscula)
- Alcance 1 m a 20 m
- Módulo montado en tarjeta con regulador de voltaje y 4 pines suministrando acceso a VCC, GND, TXD, y RXD
- Consumo de corriente: 30 mA a 40 mA
- Voltaje de operación: 3.6 V a 6 V
- Dimensiones totales: 1.7 cm x 4 cm aprox. (36)

Uno de los objetivos del proyecto era la validación del sistema por medio de la ejecución del protocolo de pruebas.

6. PROTOCOLO DE PRUEBAS

6.1 Objetivo:

Validar el funcionamiento del sensor radar en una plataforma móvil para la detección de obstáculos.

6.2 Elementos necesarios:

6.2.1 Plataforma móvil con sensor radar embarcado

Durante la ejecución del proyecto se empleó una plataforma robótica móvil consistente en un carro 4x4. Utilizando un módulo inalámbrico(blueetooth), un Arduino uno ,2 módulos Puente H L296h y una aplicación en Android, para que el usuario puede desde su teléfono móvil controlar el movimiento del vehículo. La plataforma móvil ha sido adaptada para que pueda portar las dos partes principales del proyecto:

- El sensor radar con sus respectivos circuitos de alimentación y adaptación de señal.
- La tarjeta de adquisición y procesamiento de datos. Esta tarjeta es una STEMLab Red Pitaya.

En la Figura 39 se muestra el sistema radar móvil.



Figura 39. Sistema radar móvil

6.2.2 Obstáculo de pruebas

Inicialmente se realizaron unas pruebas estáticas en donde el sensor estaba estático y lo que se movía era el carro con el corner reflector, el cual estaba diseñado para simular la sección radar de una persona que es aproximadamente 1m², ver Figura 40. Realizadas las pruebas estáticas. Se realizaron las pruebas en movimiento, para esta prueba se escogieron 4 obstáculos con diferente sección radar equivalente o RCS por sus siglas en inglés (Radar Cross-Section). Los obstáculos escogidos son: una pared, unas sillas apiladas, una persona y una rama, ver Figura 41. Las pruebas estáticas se realizaron solo con un obstáculo para tener una referencia del comportamiento del sistema radar al momento de detectar un obstáculo,



Figura 40. Plataforma móvil córner reflecto

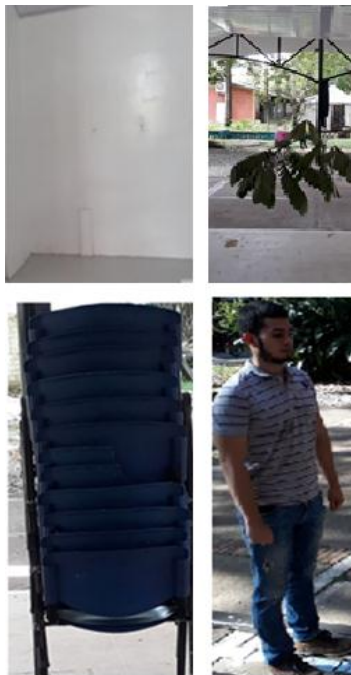


Figura 41. Obstáculos pruebas en movimiento

6.2.1 Medidor de distancia

Se implemento una cinta métrica de 3m demarcada cada 10cm y se ubicaron líneas negras sobre la cinta cada 50cm para las pruebas en movimiento. Para las pruebas estáticas se ubicaron líneas negras separadas a 50cm cada una

6.2.2 Sistema de grabado de videos

Se utilizo un celular con una cámara de 13Mpx para las grabaciones de las pruebas

6.3 Escenario de pruebas:

6.3.1 Escenario 1

El sistema radar se probó inicialmente en un ambiente de laboratorio. Para ello únicamente se requiera un espacio libre de aproximadamente dos metros de largo. Se realizó en el laboratorio que dispone actualmente el Grupo de Investigación y Desarrollo de Sensores GIDS, ubicado en el edificio Albert Einstein de la Universidad de los Llanos Sede Barcelona. Ver Figura 42

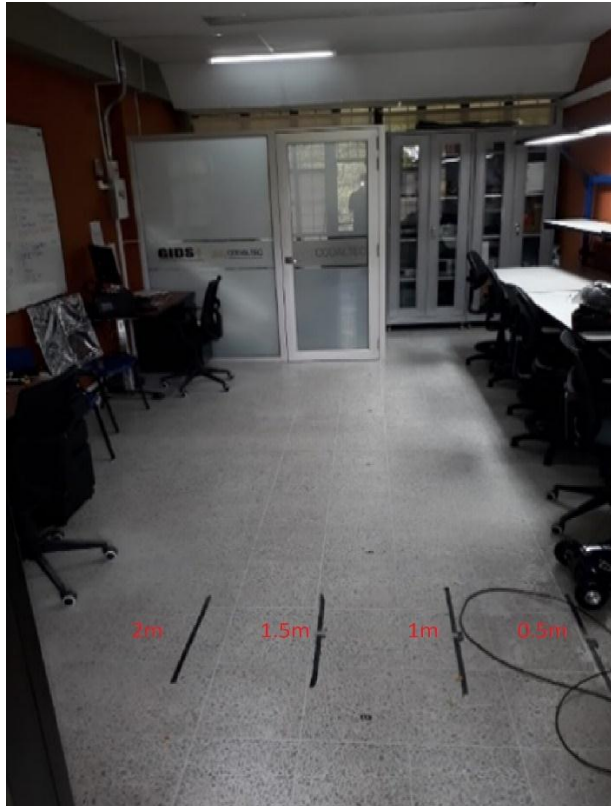


Figura 42. Escenario de pruebas estáticas

La Figura 42 muestra el escenario de las pruebas estáticas, las líneas negras corresponden a las marcas de distancia establecidas las cuales eran: 2m, 1.5m, 1m y 0.5m.

6.3.2 Escenario 2

Las pruebas se realizaron en un lugar lo más despejado posible de objetos reflectivos para evitar interferencias o detecciones de blancos que no hagan parte de las pruebas. Adicionalmente fue necesario que el suelo tuviera una superficie plana y uniforme de modo que la plataforma móvil se desplazara de manera horizontal sin experimentar demasiadas vibraciones que ocasionaran detecciones erróneas o falsas alarmas.



Figura 43. Escenario de pruebas móviles

La Figura 43 se muestran el escenario elegido para las pruebas en movimiento el cual corresponde al kiosco central de la Universidad de los Llanos ya que este espacio reunía los requisitos anteriormente descritos. Un aspecto fundamental en el proyecto fue el cálculo del número mínimo de pruebas necesarios.

6.4 Determinación del número de muestras

En las metodologías de determinación del número mínimo de observaciones, usualmente se toma de registro de experimentos anteriores, bibliografías literarias o a partir de pruebas cortas ya demostradas, pero no en todos los aspecto aplica, cuando se evalúa un método, tratamiento, técnica, tecnología y sistema nuevo, con el objeto de determinar su comportamiento y verificar si funciona de la manera esperada o, por el contrario, no surte efecto alguno (37).

Se utilizó la siguiente formula, se calcula el número mínimo de muestras necesarias para un experimento nuevo, estos datos nos ayudan a dar un estimado de la eficiencia de un experimento nuevo.

$$N = \frac{(w - w^2) * (z_{\beta} + (1.4 * z_{\alpha}))}{w^2} \quad (37)$$

Donde

N = Número mínimo de muestras, observaciones o réplicas que deben efectuarse en el estudio.

Z α = Valor correspondiente al nivel de confianza asignado.

Z β = Valor correspondiente al poder estadístico o potencia asignada a la prueba.

W = Rendimiento mínimo esperado, eficiencia mínima esperada o diferencia mínima observable.

Tabla 3. Valores de Z α para diferentes niveles de confianza

α	Nivel de confianza (1- α) (%)	$Z\alpha$
0.050	95.0	1.960
0.025	97.5	2.240
0.010	99.0	2.576

Tabla 4Valores de $Z\beta$ para diferentes niveles de poder estadístico

β	Poder estadístico (1- α) (%)	$Z\beta$
0.20	80.0	0.842
0.15	85.0	1.036
0.10	90.0	1.282

Para un método, tratamiento, técnica, tecnología y sistema nuevo es recomendable tener los valores más bajos de $Z\alpha$ y $Z\beta$ que aparecen en la Tabla 3 y la Tabla 4 con valor de W no mayor a 30%, para tener el mínimo rendimiento y analizar si los resultado tiene comportamiento confiable, ya que son métodos o técnicas nuevas.

Para este experimento se tomó un valor de $Z\alpha$ de 1.96 que corresponde a un nivel de confianza del 95%, un $Z\beta$ de 0.842 que corresponde a un poder estadístico de 80% y un W de 0.2 que corresponde a un valor del 20%. Reemplazando los valores en la formula se obtiene un número mínimo de 51 pruebas, pero se realizaron 53 pruebas para tener un poco más de confiabilidad, pero sin perder el análisis realizado por medio de la formula y para este proyecto el número de pruebas estaban en valores aceptables. Calculado el número mínimo de pruebas se realizaron las pruebas estáticas y en movimiento siguiendo un debido procedimiento.

6.5 Procedimiento

6.5.1 Pruebas blanco en movimiento, radar estático

Para verificar inicialmente que el sistema radar funcionaba de manera adecuada, se realizaron pruebas con el sensor estático, antes de las pruebas de campo. Estas pruebas consistían en mantener el sensor en una posición estática, mover de manera radial la plataforma móvil hacia el radar, la plataforma móvil tiene un córner reflector ubicado a la misma altura en la que se encontraba el sensor, la altura de sensor era aproximadamente 90cm para que el suelo no reflejara las señales transmitidas del sensor.



Figura 44. Representación pruebas estáticas

La Figura 44 muestra la disposición de los elementos. El experimento consistía en mover la plataforma de manera radial hacia el radar de manera controlada y verificar la distancia a la cual el sensor radar detecta el blanco. Se ubicaron marcas en el suelo espaciadas a 50 cm y se dispusieron indicadores luminosos que indicaron el momento en el cual el carro está a una distancia múltiplo de 50 cm. Los pasos realizados fueron los siguientes:

1. Ubicar el carro a una distancia de 2 metros del sensor. Iniciar marcha hacia delante de manera que el blanco se aproxime de manera radial hacia el sensor a una velocidad constante.
2. Verificar y anotar cuando el carro pase por la marca de 1.5 m y el led verde se active
3. Continuar con la marcha. Verificar y anotar cuando el carro pase por la marca de 1m y el led verde y azul se active.
4. Continuar con la marcha. Verificar y anotar cuando el carro pase por la marca de 50cm y el led verde, azul y amarillo se active.
5. Detener la plataforma móvil cuando se encontraba a una distancia de 20cm del sensor
6. Iniciar marcha en sentido contrario y observar si los indicadores luminosos se apagaban de acuerdo con la marca establecida.

Se guardaron las evidencias mediante archivos de video debidamente marcados con la siguiente nomenclatura: Escena1_Rep [número de repeticiones] por ejemplo Escena1_Rep [18].

Realizado cada video se registraron los datos en el formato de tablas que se presenta en la Tabla 5

Tabla 5.Toma de datos pruebas estáticas

	Rango 0		
prueba	Led 1	Led 2	Led 3
1			
2			
3			
4			
5			
%	falsa alarma	falsa alarma	falsa alarma

	Rango 1		
	Led 1	Led 2	Led 3
	detección	falsa alarma	falsa alarma

	Rango 2		
	Led 1	Led 2	Led 3
	detección	detección	falsa alarma

	Rango 3		
	Led 1	Led 2	Led 3
	detección	detección	detección

En cada casilla se diligencia “1” si el indicador luminoso correspondiente se enciende o un “0” si no se enciende. Nota: la medición se registró si el indicador luminoso permaneció encendido, pero si el indicador luminoso parpadeo no se registró la medición y se continuaba con el proceso hasta que el led permaneció encendido

6.6 Pruebas radar en movimiento, blanco estático:

Para las pruebas del radar en movimiento, blanco estático, se realizaron los siguientes pasos para cada uno de los obstáculos mencionados en el enunciado 6.2

1. Colocar una cinta métrica como referencia de distancia.
2. Ubicar el carro a una distancia de 2 metros del sensor. Iniciar marcha hacia adelante de manera que el blanco se aproxime de manera radial hacia el sensor a una velocidad constante.
3. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el indicador luminoso verde se encienda.
4. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el indicador luminoso azul se encienda.
5. Sin parar la marcha anotar la distancia cuando el indicador luminoso amarillo se encienda.
6. Para la marcha cuando sistema radar móvil este a una distancia de 10cm del obstáculo
7. Iniciar marcha en sentido contrario hasta llegar a una distancia de 2m

Repetir los pasos anteriores hasta completar las 53 pruebas.



Figura 45. Representación pruebas en movimiento

En la Figura 45 se muestra la representación de cómo se realizaron las pruebas con el radar el movimiento, obstáculos estáticos, mientras el sistema este en marcha se guardaron las evidencias mediante archivos de video debidamente marcados con la siguiente nomenclatura: Escena1_Rep [número de repeticiones] por ejemplo Escena1-P. Moviles_Rep [18]

Nota: los obstáculos no estaban ubicados de manera simultánea, se colocó el obstáculo, se realizaron los 53 ciclos, se tomó el video, se cambió al siguiente obstáculo y se realizó el mismo proceso hasta terminar con los 4 obstáculos. La medición se registró en el momento que el led permaneció encendido. Realizado cada video se registraron los datos en el formato de tablas que se presenta en la Tabla 6

Tabla 6.Toma de datos pruebas en movimiento

OBSTÁCULO			
	DISTANCIA		
prueba	led 1	Led 2	Led 3
1			
2			
3			
4			
5			

Se Realizaron las pruebas con radar estático y obstáculo en movimiento, se tomó un video y se registraron los datos en el formato de tablas que se presenta en la Tabla 5. Después se realizaron las pruebas con radar en movimiento y obstáculos estáticos, se tomó un video y se registraron los datos en el formato de tablas que se presenta en la Tabla 6 y se realizó el respectivo análisis de los resultados arrojados por las pruebas.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Resultados Pruebas con radar estático y blanco en movimiento

Las pruebas estáticas se realizaron con un cono reflector diseñado para simular la sección radar equivalente o RCS como su sigla en ingles Radar Cross-Section de una persona que es aproximadamente $1m^2$, el corner reflector estaba montado sobre la plataforma móvil a una altura de 90cm y el sistema radar estaba sobre una mesa ubicado a 85 cm del nivel de suelo.

Las Pruebas con radar estático y blanco en movimiento consistían en mover la plataforma móvil en dirección hacia el radar, registrar en una tabla con un “1” cuando el respectivo led se encienda a la distancia establecida. El control de dirección de la plataforma móvil se controló por medio de una aplicación, la cual se puede instalar en cualquier dispositivo móvil Android. Se realizan 76 pruebas y se calculó el porcentaje de detección correcta e incorrecta y de falsa alarmar y se graficaron los datos ver Figura 46. La detección correcta indica que el sistema radar detecto el obstáculo y cada led prendió en la distancia establecida, la detección incorrecta indica que el sistema radar detecto el obstáculo dentro del rango de establecido, pero cada led prendió en una distancia diferente a la establecida y la falsa alarma indica que el sistema radar detecto el obstáculo, pero alguno de los leds prendió fuera del rango de distancia.

Nota: la medición de registro si el indicador luminoso permanezca encendido, si el indicador luminoso empieza a parpadear no se registró la medición y se continuo con el proceso hasta que el led permaneció encendido..

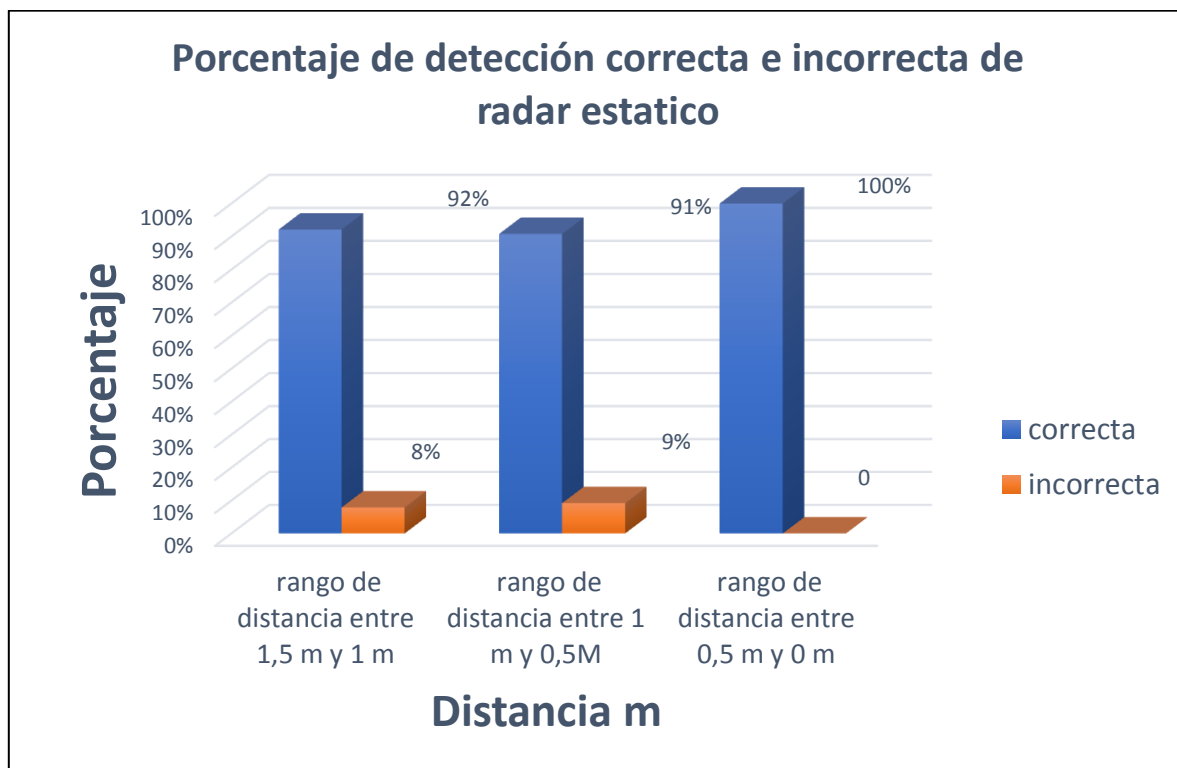


Figura 46.Resultados pruebas radar estático

En la Figura 46 se muestran los porcentajes detección correcta e incorrecta para cada rango de distancia

- Porcentaje de detección correcta en un rango de 1.5 a 1 m: 91%

- Porcentaje de detección correcta en un rango de 1 a 0.5 m: 92%
- Porcentaje de detección correcta en un rango de 0.5 a 0 m: 100%
- Porcentaje de detección incorrecta en un rango de 1.5 a 1 m: 9%
- Porcentaje de detección incorrecta en un rango de 1 a 0.5 m: 8%
- Porcentaje de detección incorrecta en un rango de 0.5 a 0 m: 0%

El porcentaje de falsa alarma no está representado en la gráfica, pero utilizando los datos de la Tabla 13 del rango de 2m a 1.5m el cual se encuentra en los anexos, se calculó el porcentaje de falsa alarma, este cálculo se realizó sumando todos los datos y dividiendo sobre el número total de datos.

- Porcentaje de falsa alarma 2m: 1%

7.2 Análisis Pruebas con radar estático y blanco en movimiento

Analizando los resultados de las pruebas con radar estático y blanco en movimiento, el porcentaje de detección correcta está por encima del 90%, esto nos indica que el sistema radar implementado tiene un alto porcentaje de detección y entre más cerca se encuentre el obstáculo del sistema radar es más precisa su detección. También nos indica si el obstáculo está en movimiento y se encuentra a una distancia de 1.5m o menor.

Los resultados arrojaron un porcentaje detección incorrecta que no superan el 10%, pero solo en un rango de 1.5m a 0.5m, esto quiere decir que 1 de cada 10 pruebas que se hagan el sistema puede tener malas detección en este rango de distancia, pero en un rango de distancia menor, la detección será precisa.

El análisis que se realizó de las pruebas con radar estático y blanco en movimiento, sirvió para tener una referencia con respecto a las medidas que se tomaron en movimiento. A pesar que se tiene un alto porcentaje de detección, esta prueba sólo se realizó con un único blanco, de características favorables para la detectabilidad por parte del radar y de ahí viene la diferencia con los blancos que se utilizaron con las pruebas en movimiento

7.3 Resultados Pruebas con radar en movimiento y blanco estático

Las pruebas en movimiento y blanco estático se realizaron con 4 obstáculos diferentes, estos obstáculos son: una pared, unas sillas apiladas, una persona y una rama, cada obstáculo tiene una altura superior de 90cm del nivel del suelo porque el sistema radar estaba montado sobre una plataforma móvil a una altura de 90cm y para que el sensor radar detectara los obstáculos estos deben superar esa altura.

Se realizaron 53 pruebas y se estimó su densidad de probabilidad la cual nos sirve para modelar la distribución de la distancia de encendido de cada LED para los diferentes obstáculos. Para estimar como se distribuye la probabilidad entre los distintos números reales de los datos se usó un histograma. Un histograma es una representación gráfica en forma de barras, donde la altura de cada barra es proporcional a la frecuencia relativa de los valores que puede tomar la variable aleatoria (38). En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables.

Existen muchas formas para calcular la densidad de probabilidad, existe la distribución de variable aleatoria uniforme, variable aleatoria gaussiana, variable aleatoria exponencial entre otras. Para el proyecto se utilizó una densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana, ya que es un método muy sencillo de implementar. La importancia de esta distribución radica en

que permite modelar numerosos fenómenos y modelos estadísticos (38). Utilizando la siguiente formula:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Donde:

X = distancia establecida

σ = desviación estándar

σ^2 = varianza

μ = media

La densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana, se aplicó a cada uno de los resultados de los obstáculos los cuales se muestran a continuación.

Nota: los obstáculos no estaban ubicados de manera simultánea, se colocó el obstáculo, se realizaron los 53 ciclos, se tomó el video, se cambió al siguiente obstáculo y se realizó el mismo proceso hasta terminar con los 4 obstáculos. La medición se registró en el momento que el led permaneció encendido.

7.3.1 Pared

En la Figura 47 se muestra el montaje de las pruebas con la pared, como se había explicado anteriormente las prueba consiste en poner en marcha el sistema radar móvil hacia el obstáculo, detener la marcha cuando el sistema radar móvil se encontró a una distancia de 20 cm del obstáculo y poner marcha hacia atrás y detener la marcha a una distancia de 2 m, se realizó este procedimiento 53 veces.



Figura 47. Montaje pruebas en pared

En la Figura 48 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con la pared, cada color equivale a cada uno de los leds

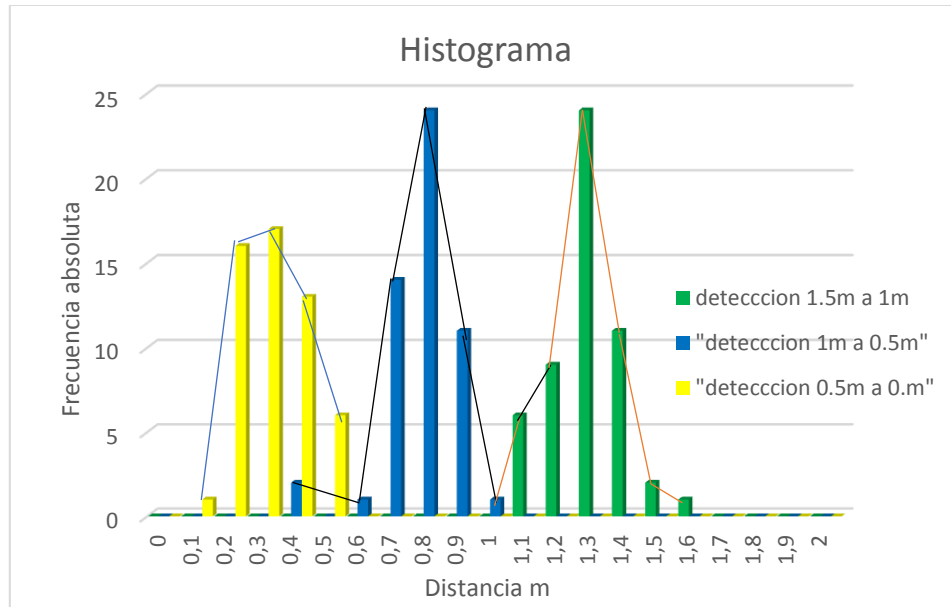


Figura 48.Histograma resultados pared

En la Figura 48 se muestran 3 conjunto de barras de diferente color cada uno muestra la dispersión de los 3 rangos de distancia seleccionados, uniendo con una línea cada una de las barras se muestra una forma similar a una variable aleatoria gaussiana. Para calcular la densidad de probabilidad con una distribución de variable gaussiana eran necesarios los valores de media, varianza y desviación estándar, estos valores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7.valores de media, varianza, desviación estándar pared

	Led verde	Led azul	Led amarillo
Media (m)	1,29433962	0,77924528	0,31320755
Varianza (m)	0,01169811	0,01206096	0,01078374
Desviación estándar (m)	0,10815782	0,10982239	0,10384481

Reemplazando los valores de varianza, media, desviación estándar en la fórmula de densidad de probabilidad y tomando valores de x desde 0 hasta 2 en pasos de 0.05 se obtuvo la siguiente grafica

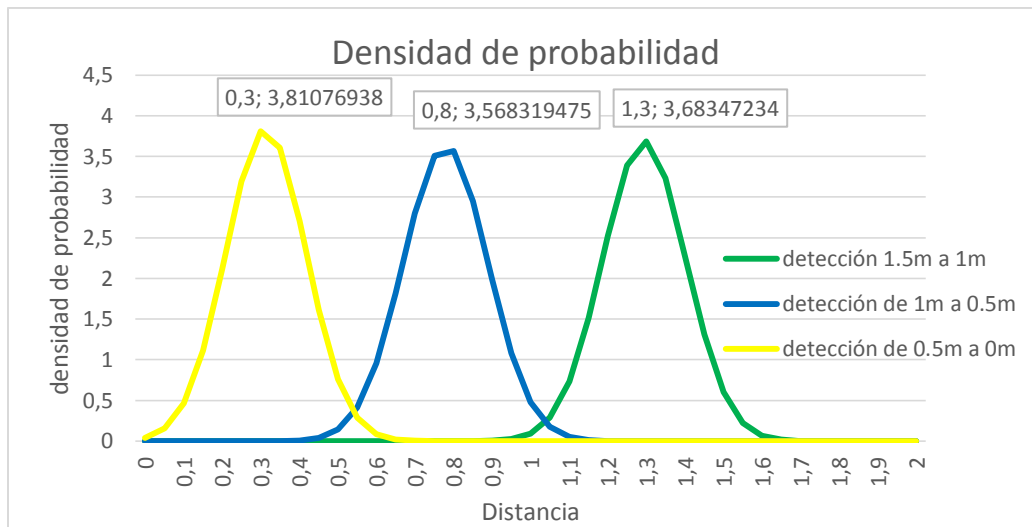


Figura 49. Densidad de probabilidad pared

En la Figura 49 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana para la pared, el cual se usó para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los leds.

Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo pared es de 1.3m con una desviación de 10cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 80cm con una desviación de 10cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 30cm con una desviación de 10cm.

7.3.2 Sillas

En la Figura 50 se muestra el montaje de las pruebas en movimiento con la sillas, como se había explicado anteriormente la prueba consiste en poner en marcha el sistema radar móvil hacia el obstáculo, detener la marcha cuando el sistema radar móvil se encontró a una distancia de 20 cm del obstáculo y poner marcha hacia atrás y detener la marcha a una distancia de 2 m, se realizó este procedimiento 53 veces.



Figura 50. Montaje prueba en silla

En la Figura 51 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con las sillas apiladas, cada color equivale a cada uno de los leds

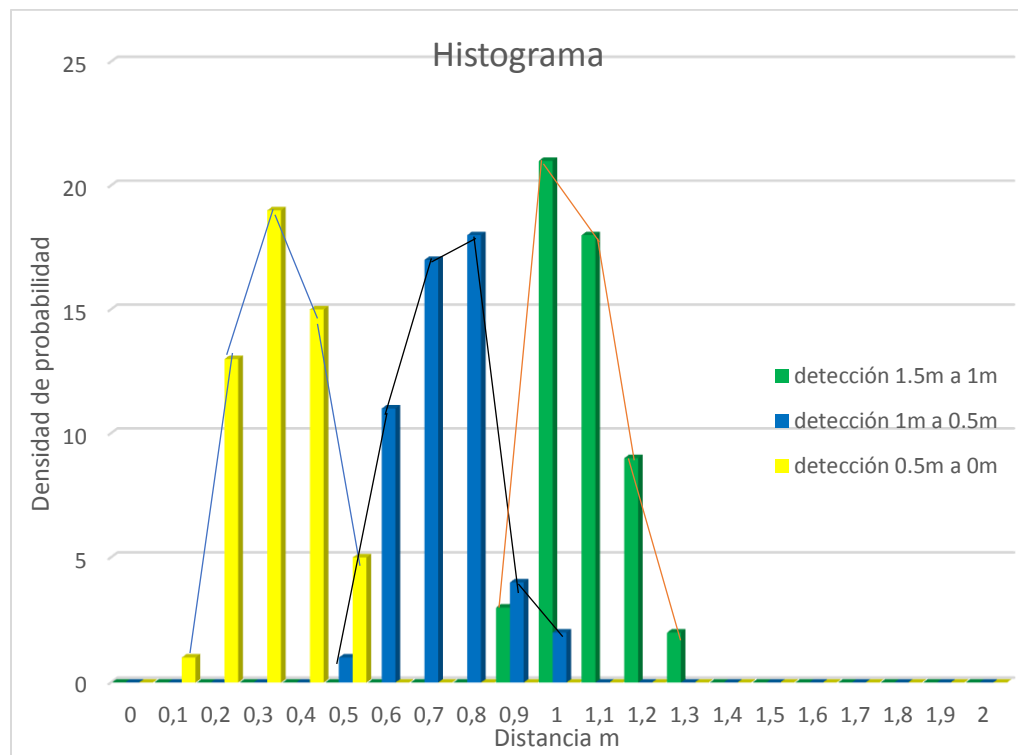


Figura 51. Histograma resultados sillas

En la Figura 51 se muestran 3 conjuntos de barras de diferente color cada uno muestra la dispersión de los 3 rangos de distancia seleccionados, uniendo con una línea cada una de las barras se muestra una forma similar a una variable aleatoria gaussiana. Para calcular la densidad

de probabilidad con una distribución de variable gaussiana eran necesarios los valores de media, la varianza y la desviación estándar, estos valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. valores de media, varianza, desviación sillas

	Led verde	Led azul	Led amarillo
Media (m)	1,07358491	0,63584906	0,31886792
Varianza(m)	0,00890421	0,01157475	0,00963716
Desviación estándar (m)	0,09436212	0,10758599	0,09816901

Reemplazando los valores de varianza, media, desviación estándar en la fórmula de densidad de probabilidad y tomando valores de x desde 0 hasta 2 en pasos de 0.05 se obtuvo la siguiente grafica

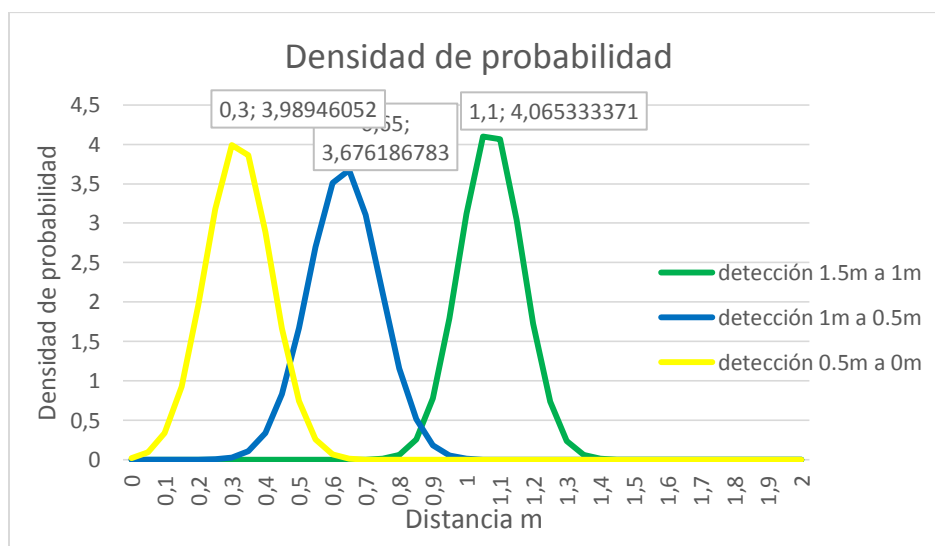


Figura 52. Densidad de probabilidad sillas

En la Figura 52 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana para las sillas apiladas, el cual se usó para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los leds.

Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 1.1 m con una desviación de 9.5cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 80cm con una desviación de 10cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 30cm con una desviación de 9.8cm.

7.3.3 Persona

En la Figura 53 se muestra el montaje de las pruebas en movimiento con la sillas, como se había explicado anteriormente la prueba consiste en poner en marcha el sistema radar móvil hacia el obstáculo, detener la marcha cuando el sistema radar móvil se encuentre a una distancia de 20 cm del obstáculo y poner marcha hacia atrás y detener la marcha a una distancia de 2 m, se realizó este procedimiento 53 veces.



Figura 53. Montaje pruebas en persona

En la Figura 54 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con las sillas apiladas, cada color equivale a cada uno de los leds

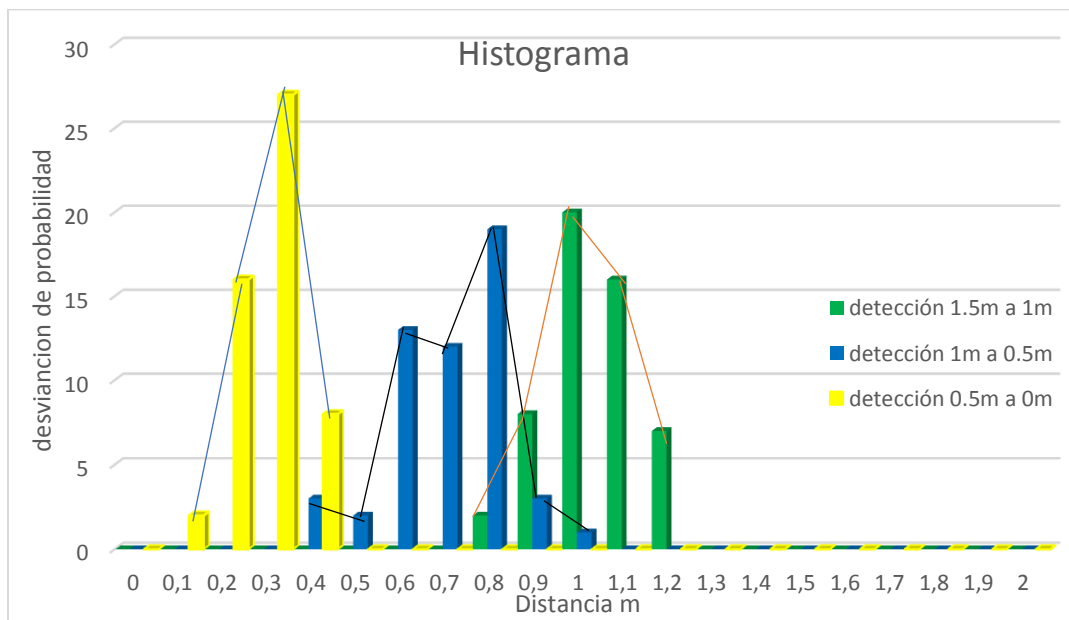


Figura 54. Histograma resultados persona

En la Figura 54 se muestran 3 conjuntos de barras de diferente color cada uno muestra la dispersión de los 3 rangos de distancia seleccionados, uniendo con una línea cada una de las barras se muestra una forma similar a una variable aleatoria gaussiana. Para calcular la densidad de probabilidad con una distribución de variable gaussiana eran necesarios los valores de media, varianza y desviación estándar, estos valores se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9.valores de media, varianza, desviación persona

	Led verde	Led azul	Led amarillo
media	1,03396226	0,70377358	0,27735849
varianza	0,01036284	0,01690856	0,00563135
Desviación estándar	0,10179806	0,13003293	0,07504232

Reemplazando los valores de varianza, media, desviación estándar en la fórmula de densidad de probabilidad y tomando valores de x desde 0 hasta 2 en pasos de 0.05 obtenemos la siguiente grafica

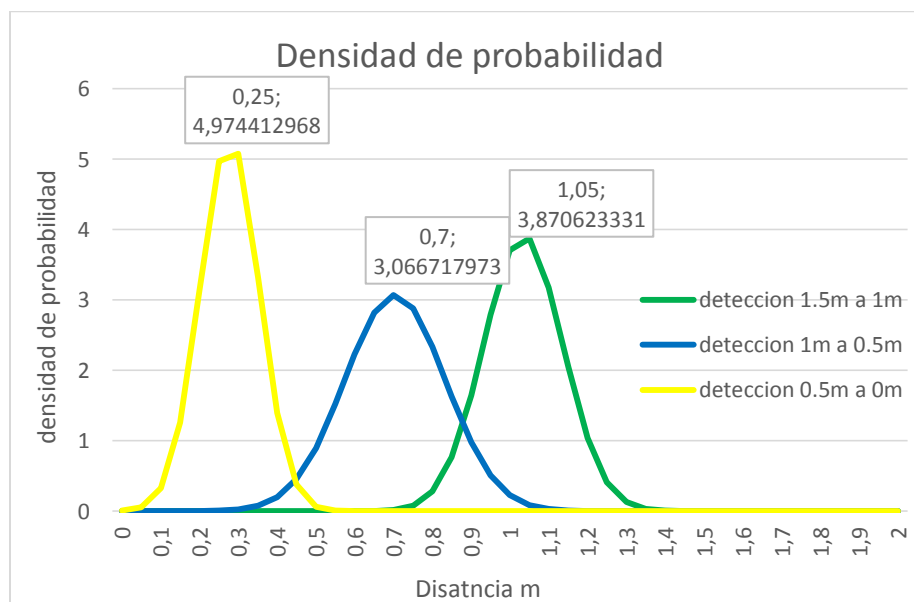


Figura 55.Densidad de probabilidad persona

En las Figura 55 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana para la persona, el cual se usó para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los leds.

Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 1m con una desviación de 10cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 70cm con una desviación de 13cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 25cm con una desviación de 7.5cm.

7.3.4 Rama

En la Figura 56 se muestra el montaje de las pruebas en movimiento con la sillas, como se había explicado anteriormente las prueba consiste en poner en marcha el sistema radar móvil hacia el obstáculo, detener la marcha cuando el sistema radar móvil se encuentre a una distancia de 20cm

del obstáculo y poner marcha hacia atrás y detener la marcha a una distancia de 2m, se realizó este procedimiento 53 veces.



Figura 56.Montaje pruebas en rama

En la Figura 57 se muestra el histograma de los resultados obtenidos con las sillas apiladas, cada color equivale a cada uno de los leds

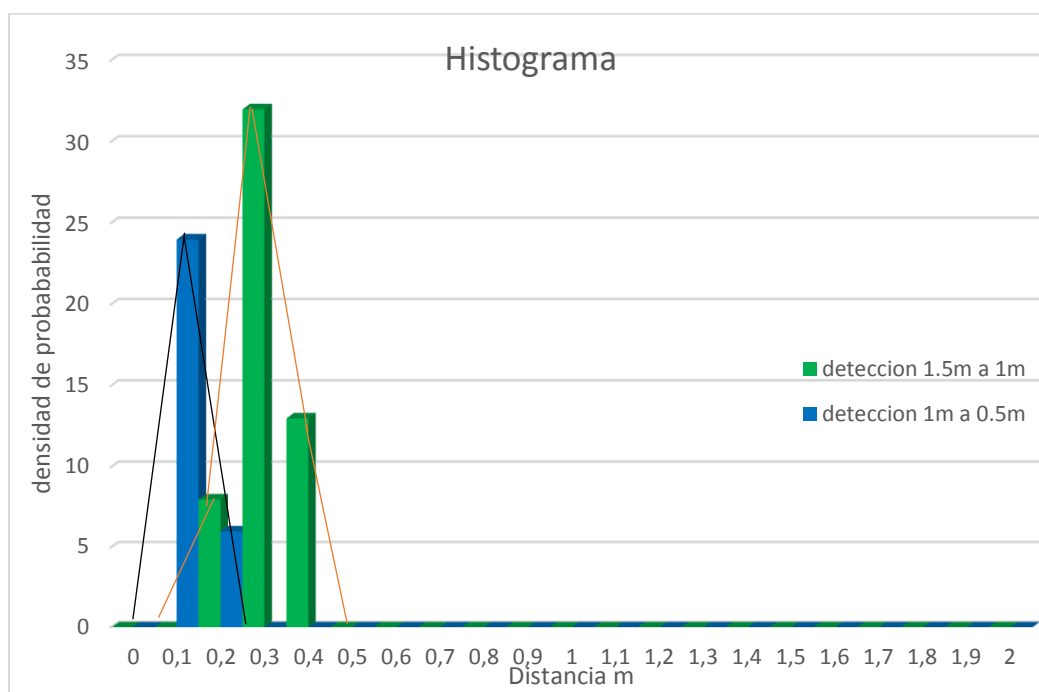


Figura 57.Histograma resultados rama

En la Figura 57 se muestran 2 conjuntos de barras de diferente color cada uno muestra la dispersión de solo 2 rangos de distancia, uniendo con una línea cada una de las barras se muestra una forma similar a una variable aleatoria gaussiana. Para calcular la densidad de probabilidad con

una distribución de variable gaussiana eran necesarios los valores de media, varianza y desviación estándar, estos valores se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.valores de media, varianza, desviación rama

	Led verde	Led azul
Media (m)	0,30943396	0,12
Varianza (m)	0,00394775	0,00165517
Desviación estándar (m)	0,06283113	0,04068381

Reemplazando los valores de varianza, media, desviación estándar en la fórmula de densidad de probabilidad y tomando valores de x desde 0 hasta 2 en pasos de 0.05 obtenemos la siguiente grafica

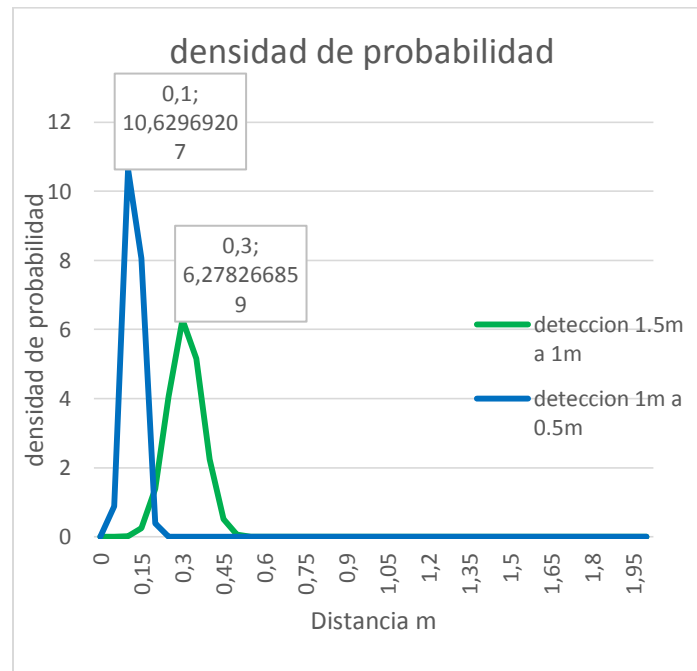


Figura 58.Densidad de probabilidad rama

En las Figura 58 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana para la rama, el cual se usó para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los leds.

Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 30cm con una desviación de 6cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 10cm con una desviación de 3cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana no hubo detección.

7.3.5 Sin obstáculo

Se realizó un grabado de las pruebas sin ningún obstáculo, con estas pruebas se sacó la probabilidad de falsa alarma, que es la probabilidad de generar una alerta con un blanco no existente, para calcular la probabilidad de falsa alarma de cada uno de los leds, se tomaron los datos obtenidos de las pruebas sin ningún obstáculo, se realizó la sumatoria de los datos de las detecciones y se dividió por el número total de pruebas, cada led representa un rango de distancia.

Led verde (1.5m -1m), led azul (1m a 50cm) y el led amarillo (50m-cm), Los resultados se muestran a continuación.

- Probabilidad de falsa alarma led verde 1.5m a 1m: 13%
- Probabilidad de falsa alarma led azul 1m a 0.5m: 9%
- Probabilidad de falsa alarma led amarillo 0.5m a 0m: 0%

7.3.6 Pared, sillas y personas

Con los datos obtenidos en las pruebas anteriores se tuvo un estimado de cómo se comportará el radar móvil al encontrarse con diferentes obstáculos estáticos, sin embargo, se intenta buscar un parámetro global aplicable a todos los blancos en conjunto y no de forma particular a cada uno, esto se realizó agrupando los datos de los 3 primeros obstáculos y después agrupando los datos de los 4 obstáculos.

Se inició agrupando los datos de los 3 primeros obstáculos para dar el estimado de la densidad de probabilidad y un estimado de la distancia con mayor probabilidad de detección de cada uno de los leds, para obstáculos con RCS que estén dentro del rango de la RCS de la pared, sillas apiladas y personas.

En la Tabla 11 se muestran los valores de varianza, media y desviación estándar de los datos agrupados de los 3 obstáculos

Tabla 11.valores de media, varianza, desviación para los 3 primeros obstáculos

	Led verde	Led azul	Led amarillo
media	1,13396226	0,70628931	0,30314465
varianza	0,77816456	0,17278481	0,09759494
Desviación estándar	0,88213636	0,41567392	0,31240188

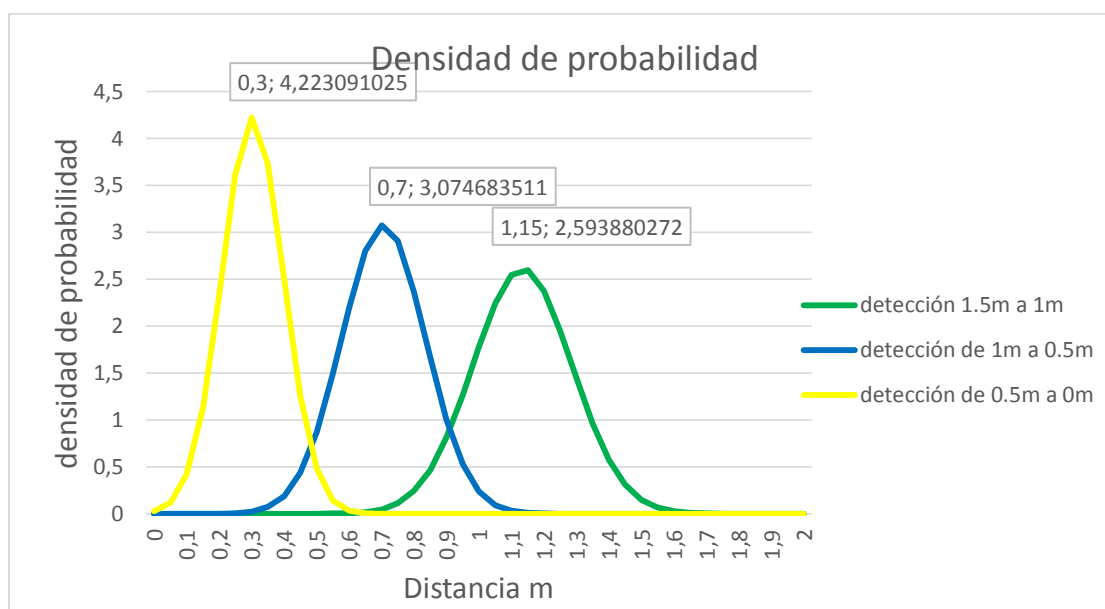


Figura 59.Densidad de probabilidad conjunta pared, sillas y persona

En la Figura 59 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana para obstáculo que tenga RCS que estén dentro del rango de las RCS de los obstáculos

establecidos sin incluir la rama, el cual se usó para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección para cada uno de los leds.

Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad de detección es de 1.15m con una desviación estándar de 15cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad de detección es de 70cm con una desviación de 12cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana, la distancia con mayor probabilidad de detección es de 30cm con una desviación estándar de 9.4cm.

7.3.7 Pared, sillas, personas y rama

Los resultados anteriores muestran un estimado de cómo se comportaría el sistema radar frente a obstáculos que no tenga RCS bajas como el de una rama, por tal motivo se buscó dar un estimado de la densidad de probabilidad para identificar la distancia con mayor probabilidad de detección de cada uno de los leds para obstáculos con RCS que estén dentro del rango de las RCS de los obstáculos establecidos, esto se realizó agrupando los datos de todos los obstáculos y calculando la varianza, la media y la desviación estándar. En la Tabla 12 se muestran los valores de varianza, media y desviación estándar de los datos agrupados de los todos obstáculos.

Tabla 12. valores de media, varianza, desviación para todos los obstáculos

	Led 1	Led 2	Led 3
media	0,92783019	0,54669811	0,22735849
varianza	0,14656778	0,05788377	0,01100309
Desviación estándar	0,38284172	0,24059046	0,10489559

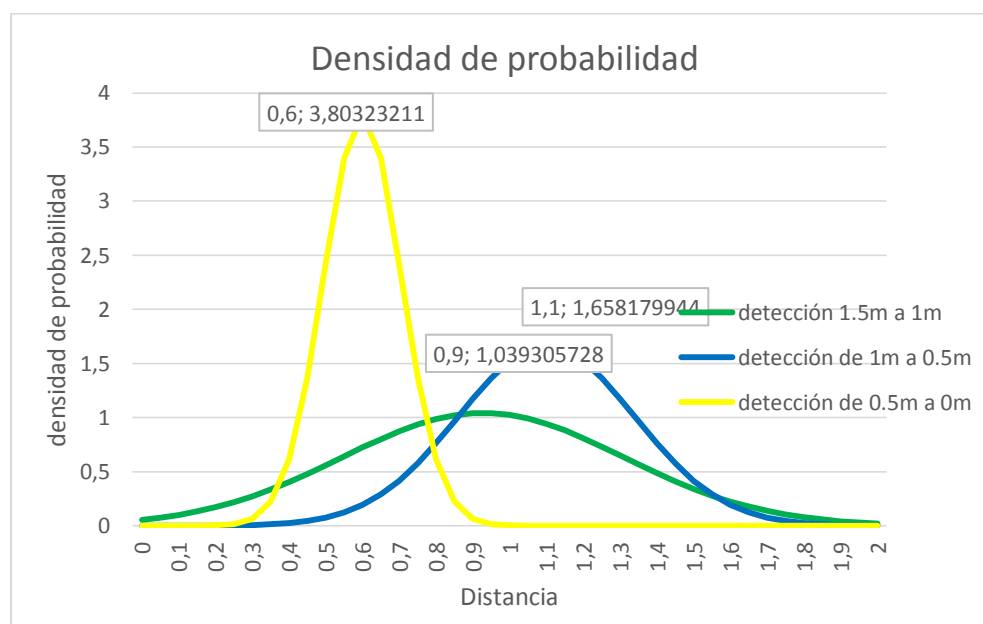


Figura 60. Densidad de probabilidad conjunta de todos los obstáculos

En la Figura 60 se muestra la densidad de probabilidad con distribución de variable aleatoria gaussiana de todos los 4 obstáculos combinados y en la Tabla 12 se muestran los valores de varianza, media y desviación estándar, el cual se usó para identificar cual es la distancia con mayor probabilidad de detección de cada uno de los leds. Para el led verde el cual indica la distancia más lejana, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 90cm con una

desviación de 30cm. Para el led azul el cual indica la distancia media, la distancia con mayor probabilidad a la cual se detectó el obstáculo es de 1.1m con una desviación de 24cm. Para el led amarillo el cual indica la distancia más cercana, la distancia con mayor probabilidad de detección es de 60cm con una desviación estándar de 10cm.

7.4 Análisis pruebas con radar en movimiento y obstáculos estáticos

7.4.1 Análisis resultados separados

Los resultados individuales de los obstáculos muestran que utilizando un sistema radar de este tipo se podría detectar obstáculos a distancias de 5cm hasta 1.5m. Este tipo de sistema implementado con este tipo de sensor se podría usar para detecciones en 3 niveles de cercanía: LEJOS con distancias de 1m hasta 1.5m, MEDIO con distancias de 50cm hasta 1m y CERCA con distancias de 5cm hasta 50cm.

Los resultados también muestran que la media de la densidad de probabilidad de la pared es la mayor en los 3 niveles de cercanía en comparación a los demás obstáculos, esto tiene sentido porque se entiende que la RCS de la pared es mayor en comparación a los demás obstáculos, el segundo obstáculo con la mayor RCS eran las sillas apiladas ya que la RCS también depende de la altura del obstáculo y las sillas apiladas tenían mayor altura que la persona y la rama pero menor que la pared, el tercer obstáculo con la mayor RCS es la persona y por último la rama ya que la RCS de una rama es muy baja en comparación a los otros obstáculos establecidos.

NOTA: para nuestro contexto la media se asume como la distancia con mayor probabilidad de detectar el obstáculo.

Dado a que la rama es el obstáculo con menor RCS se calculó su probabilidad de detección para cada nivel de cercanía, para tener una referencia de la probabilidad de detección para obstáculos con RCS similares a la rama, recordar que cada nivel de cercanía está asociada a un indicativo LED, LED verde/lejos, LED azul/medio y LED amarillo/cerca, esto se realizó para visualizar el rango de distancia donde se encontraba el obstáculo. El cálculo se realizó contando las veces el led detecto la rama y dividiendo sobre el número de pruebas.

- probabilidad de detección del blanco con menor RCS LED verde/lejos: 100%
- probabilidad de detección del blanco con menor RCS LED azul/medio: 57%
- probabilidad de detección del blanco con menor RCS LED amarillo/cerca: 0%

Estos resultados tienen sentido porque se estimó la distancia del objeto utilizando la reflectividad del obstáculo, es decir dependiendo la amplitud de la señal arrojada del módulo radar que a su vez esa señal depende de la RCS o reflectividad se estimó en cuál de los 3 niveles de cercanía se encontraba el obstáculo, por tal motivo la rama muestra 100% de probabilidad de detectar un obstáculo, esto no quiere decir que este en el rango de distancia correcto, la detección del LED verde/lejos estaba programada para detecciones entre 1m y 1.5m, pero las pruebas arrojaron detecciones menores a 50cm (ver anexos) y esto se debe a que la señal arrojada del módulo radar de una rama ubicada a una distancia entre 5cm y 50cm es similar al de una persona, sillas o pared a una distancia entre 1m y 1.5m. Ver Figura 61

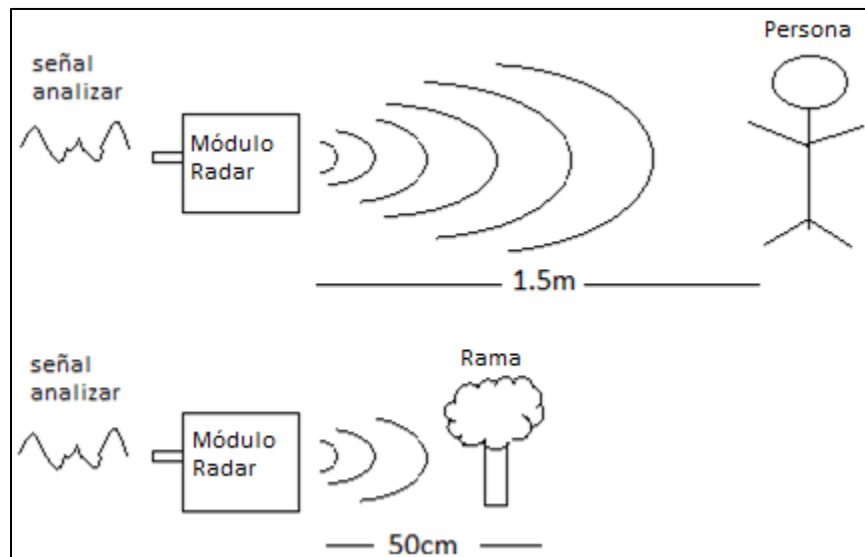


Figura 61.Comparación persona contra rama

En la Figura 61 se muestra que para el sistema radar una rama ubicada a una distancia de 50cm o menor es igual a un obstáculo ubicado a una distancia entre 1m y 1.5m, ya que se estaba estimando en que cual de los 3 niveles de cercanía se encuentra el obstáculo analizando la amplitud de la señal arrojada del módulo radar y como se muestra en la Figura 61 las señales son similares para la persona y la rama, el sistema radar asume que están en la misma distancia.

7.4.2 Análisis conjunto sin rama

Se realizó el análisis de los resultados individuales de cada uno obstáculos, para tener un estimado de cómo se comportó el sistema radar móvil al encontrarse con diferentes obstáculos estáticos, pero también se hizo un consolidado de los resultados de la pared, sillas y persona, para dar un estimado de cómo se comportaría el sistema radar frente a obstáculos con RCS que estén dentro del rango de RCS de las sillas apiladas, persona y pared, para no solo tener el estimado de forma particular de cada obstáculo.

Al realizar la combinación de las densidades de probabilidad de los obstáculos sin la rama, se puede decir que los obstáculos con RCS que estén dentro del rango de RCS de la pared, sillas apiladas o personas se podría detectar con un sistema radar de este tipo a distancias entre 1.5m hasta 5cm. Este tipo de sistema implementado con este tipo de sensor se podría usar para detecciones en 3 niveles de cercanía: LEJOS con distancias entre 1.5m hasta 1m, MEDIO con distancias entre 1m hasta 50cm y CERCA con distancias entre 50cm hasta 5cm.

El error estándar o desviación estándar en el LED amarillo/cerca es menor en comparación a los otros LEDS, esto tiene sentido porque entre más cerca este el sistema radar del obstáculo menos aleatorias serán sus mediciones de distancia y esto se debe a que la estimación de la distancia de separación entre el radar y el obstáculo se realizó utilizando la amplitud de la señal arrojada del módulo radar que a su vez esta depende de la RCS del obstáculo. En pocas palabras el LED amarillo tiene menor error estándar porque sus mediciones no son tan aleatorias porque la estimación de la distancia de separación entre el sistema radar y el obstáculo depende de la reflectividad o RCS y uno de los factores que influye en el valor de la RCS es la distancia entre el radar y el obstáculo.

Los resultados combinados de las sillas apiladas, persona y pared, también muestran que la media de la densidad de probabilidad de cada indicativo led está dentro de los márgenes de los niveles de cercanía correspondientes para cada led, pero el error estándar del LED verde/lejos está en un

valor de 9cm y su media en un valor de 1.1m, esto da entender que existe la posibilidad que el indicativo LED verde/lejos tenga detecciones en el nivel de cercanía MEDIO para obstáculo que este dentro del rango de RCS de los obstáculos establecidos sin incluir la rama.

NOTA: para nuestro contexto la media se asume como la distancia con mayor probabilidad de detectar el obstáculo.

7.4.3 Análisis conjunto de los obstáculos

Se realizó el análisis de los resultados conjunto de los obstáculos pared, sillas apiladas y personas para tener un estimado de cómo se comportaría el sistema radar móvil al encontrarse con obstáculos con RCS que estén dentro del rango de RCS de los obstáculos establecidos sin incluir la rama, pero también se hizo un consolidado de los resultados de todos los 4 obstáculos para dar un estimado de cómo se comportaría el sistema radar frente a obstáculos que estén dentro del rango de los 4 obstáculos establecidos para no tener solo el estimado de los obstáculos con buena reflectividad.

Al analizar las densidades de probabilidad conjunta de los 4 obstáculos se podría decir que este tipo de sistema implementado con este tipo de sensor se podría usar para detecciones en 3 niveles de cercanía: LEJOS con distancias entre 1.5m hasta 1m, MEDIO con distancias entre 1m hasta 50cm y CERCA con distancias entre 50cm hasta 5cm.

Los resultados combinados de los 4 obstáculos, también muestran que la media de cada indicativo led esta fuera del rango de distancia establecido para cada uno, recordar que cada led está asociado a un nivel de cercanía, LED verde/lejos con media de 90cm, LED azul/medio con media de 1.1m y LED amarillo/cerca con media de 60cm. Estos resultados tienen sentido porque se realizó un consolidado de las densidades de probabilidad de todos los 4 obstáculos y la rama al ser un obstáculo con tan poca RCS sus mediciones afectaron en gran escala la media de la densidad de probabilidad de cada led ya que el estimado de la distancia de separación del sistema radar y el obstáculo se realizó utilizando la amplitud de la señal arrojada por el módulo radar que a su vez esa señal depende de la RCS del obstáculos, por eso los resultados de la rama dieron tan imprecisos y por eso la media de cada indicativo led esta fuera del rango establecido.

El error estándar o desviación estándar del LED verde/lejos es de 38cm, este valor es mayor en comparación a los otros LED, esto da entender que al momento de detectar obstáculos que estén dentro del rango de RCS de los obstáculos establecidos, el indicativo LED verde/lejos detectara en cualquiera de los 3 niveles de cercanía, en pocas palabras el LED verde/lejos no tendría una buena estimación de distancia ya que sería muy impreciso. El LED azul/medio tiene un error estándar 24cm menor que el LED verde/lejos, pero aun así la media está fuera del rango, al momento de realizar una detección el LED azul estaría oscilando entre el nivel de cercanía LEJOS Y CERCA. El LED amarillo/cerca tiene un error estándar de 10cm menor que los otros 2 leds, pero al igual que los otros 2 leds su media está fuera del rango, entonces al momento de realizar una detección el LED amarillo/cerca estaría en el nivel de cercanía MEDIO.

Las densidades de probabilidad del LED azul/medio y el LED amarillo/cerca que se muestran en la Figura 60, no son confiables ya que en varias pruebas en el nivel de cercanía MEDIO no hubo detecciones y en el nivel de cercanía CERCA tampoco hubo ninguna detección

7.5 Dificultades encontradas

El sistema radar móvil tiene incorporado un radar onda continua el cual debe estar apuntando directamente al obstáculo, un cambio de esta dirección afecta mucho la medición, porque ya no se recibe toda la señal del eco reflejado. Cuando se realizaron las pruebas inicialmente se tuvieron muchas dificultades, ya que la plataforma móvil tendía a desviar su dirección hacia la derecha porque, pero no existía un sistema que garantizara que todos los motores marcharan a las misma

RPM y no se podía modificar la dirección con la aplicación por que generaban cambios bruscos y el sensor tomaba ese cambio como si fuera un blanco a una distancia lejana. Por tal motivo se utilizaron unos rieles de apoyo para que el sistema no tuviera esa desviación. Ver Figura 62

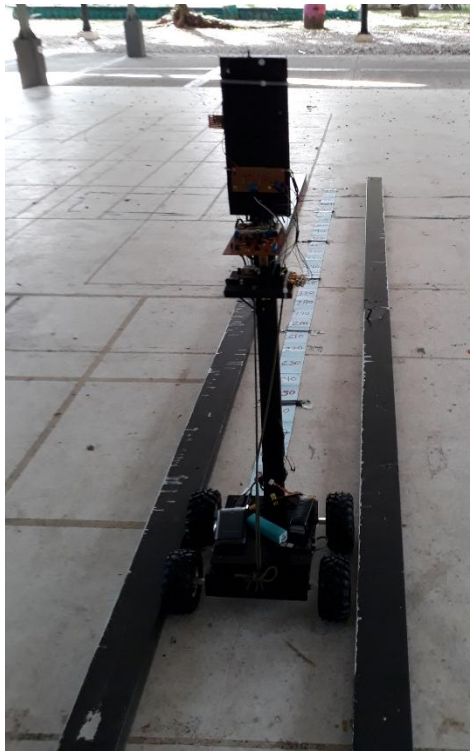


Figura 62. Escenario de pruebas con rieles

En la Figura 62 se muestra el sistema radar con los rieles implementados, con esta modificación se evitó la desviación hacia la derecha, que no permitía analizar toda la potencia de la señal recibida, la cual generaba detecciones incorrectas.

8. CONCLUSIONES

- Utilizando la amplitud de la señal recibida del sensor se dio un estimado del rango de distancia donde se encontraba el obstáculo, valiéndonos del hecho que existe un movimiento relativo entre la distancia de separación del blanco y el radar. El sistema radar opero en un rango de distancia entre 1.5m a 5cm, distancias menores no se contemplaron ya que era innecesario considerarlas porque prácticamente ya seria chocar con el objeto, se logró estimar esas distancias en ciertas condiciones favorables, como un suelo liso, una plataforma móvil con velocidad constante, unas bases de apoyo para minimizar las desviaciones de la plataforma móvil y un espacio suficientemente amplio donde no se encuentre demasiados objetos reflectivos. Los radares onda continua se emplean con mayor frecuencia en aplicaciones para medición de velocidad y detección de presencia
- La tarjeta de adquisición STEMLab Red pitaya tiene una velocidad de adquisición de 125MS/s y las API del fabricante son muy sencillas de implementar. Se aprende a establecer conexión SSH y comandos en sistema operativo Linux que hoy en día son muy importantes para comunicación de redes. En la referencia (23) se encuentra la URL del blog realizado, este blog es un tutorial para que cualquier persona de la comunidad empresarial o académica que vaya a generar un desarrollo con este tipo de tarjeta pueda hacerlo en un tiempo corto, en el blog se encuentra la información respecto a cómo programar y establecer comunicación con la STEMLab Red pitaya. Este blog se realizó durante la pasantía con el fin de documentar todo el trabajo realizado con la Red pitaya ya que es importante conocer estas nuevas herramientas porque en la universidad de los llanos no se había trabajado aún con ella.
- En aplicaciones donde se requiera medir la distancia del obstáculo en un rango de 1.5m a 5cm y no se necesite una precisión exacta, se puede utilizar este tipo de sistema radar ya que este puede detectar obstáculo con RCS similares a las sillas apiladas, persona o pared, pero para obstáculos como RCS bajas como la rama, el sistema radar tendrá un estimación errónea de la distancia del obstáculo ya que esa estimación se dio a partir de la amplitud de la señal arrojada del sensor radar que su vez esa señal depende de la RCS del obstáculo y como la rama tiene una RCS baja por eso el sistema radar no alcanza a detectar el obstáculo o si lo detecta la medición será errónea.
- Para este proyecto se realizó una búsqueda bibliográfica para determinar el número mínimo de pruebas necesarias para tener resultados que mostraran una información confiable. Como no había documentación o registros anteriores de experimento similares, el cálculo se realizó sobre estudios que determinan el número mínimo de pruebas necesarias para estudios nuevos. Además, las pruebas realizadas en este proyecto estuvieron sometidas bajo un protocolo de prueba con el fin de tener una estandarización de los resultados para que cualquier persona que desee repetir el proyecto obtenga valores similares a los expuesto en este informe. Esto se realizó ya que la cantidad de pruebas es un factor importante al momento de realizar el proyecto, si la cantidad de pruebas eran muy pocas los resultados no mostraran una información confiable, pero si era muchas hubiera tomado demasiado tiempo realizarlas.
- Realizar prácticas en una empresa ayuda mucho para aprender sobre el ambiente interno, adaptarse a un horario laboral, realizar cotizaciones, hablar con proveedores, trabajar con equipos profesionales, aprender nuevo conocimiento del grupo de trabajo, obtener experiencia laboral que hoy en día es un factor importante al momento de conseguir trabajo y también tener la posibilidad de vincularse en un proyecto de la empresa.

9. REFERENCIAS

1. González, Daniel Vargas. Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
2. Agrelo, David Varela. Diseño y Validación de un radar CW-FM a 94GHz. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
3. Pérez, Jordi Marco. Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas . 2015.
4. Zozaya, A. J. Definiciones básicas de un sistema de radar . s.l. : Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), Escuela Politécnica Nacional (EPN), 2016.
5. Basics on Radar Cross Section Reduction. Rezende, Marcelo A. S. Miacci and Mirabel C. Brazil : Institute of Aeronautics and Space, Department of Aerospace Science and Technology,, 2012.
6. <http://www.rfcafe.com>. [En línea] [Citado el: 15 de 12 de 2018.]
<http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/radar-cross-section.htm>.
7. Skolnik, Merrill I. INTRODUCTION TO RADAR SYSTEMS. s.l. : McGRAW-HILL, 1981.
8. motorpasion. [En línea] 19 de 07 de 2018. [Citado el: 14 de 11 de 2018.]
<https://www.motorpasion.com/seguridad/los-radares-velolaser-al-descubierto-socialdrive-revela-la-ubicacion-de-22-dispositivos>.
9. Constantino Pérez Vega . RADAR, INTRODUCCION AL. santander(España) : s.n., 2010.
10. fullexperimentos. [En línea] 13 de 10 de 2012. [Citado el: 15 de 11 de 2018.]
<http://www.fullexperimentos.com/experimento-del-efecto-doppler/>.
11. Radares para el control del tráfico. Huidobro, José Manuel. 2016.
12. MEDICION DE VELOCIDADES DE FLUIDOS POR EFECTO DOPPLER. Zubieta, Boris Alberto López. La paz - Bolivia : Revista Boliviana de Física, 2008.
13. Solórzano, César Aldo Canelo y Quiñones, Walter Alberto. Diseño e implementación de un Sistema de Radar Estático de Corto Alcance de Onda Continua en Frecuencia Modulada para mediciones de rango y velocidad. Lima, Perú : PONTIFICA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, 2015.
14. Implementation of algorithms for radar real-time signals processing using a microprocessor based platform. gomez, felipe silva. 2015.
15. Wolff, Christian. radartutorial.eu. [En línea] [Citado el: 16 de 10 de 2018.]
<http://www.radartutorial.eu/01.basics/Principio%20B%C3%A1sico%20de%20Funcionamiento.es.html>.
16. Agilsense. msl. [En línea] 16 de 05 de 2017. [Citado el: 30 de 07 de 2018.]
https://www.limpkin.fr/public/HB100/HB100_Microwave_Sensor_Module_Datasheet.pdf.
17. 22xd.blogspot. [En línea] [Citado el: 15 de 10 de 2018.]
<https://22xd.blogspot.com/2016/03/ejemplos-basicos-del-convertidor.html>.
18. Conversores Análogo-Digital y Digital-Análogo:. Huircán, Juan Ignacio.
19. Analog Engineer's Circuit Cookbook:. Tim Green, Pete Semig and Collin Wells. s.l. : Texas Instrument, 2018, Vol. 1. SLYY137.
20. alldatasheet. [En línea] ON semiconductor, 2004. [Citado el: 22 de 09 de 2018.]
<http://html.alldatasheet.com/html-pdf/12024/ONSEMI/MC33202/181/1/MC33202.html>.
21. Braga, Newton C. INCB. [En línea] 30 de 10 de 2017. [Citado el: 15 de 11 de 2018.]
<http://www.incb.com.mx/index.php/articulos/12-informacion-y-ideas-practicas-ip000s/1679-lo-que-significa-rail-to-rail-rro-art279s>.
22. Ramírez, Darío. Fuentes de Alimentación. s.l. : Electro componentes SA, 2011.
23. radaresysensores. [En línea] 30 de 07 de 2018.
<https://radaresysensores.wordpress.com/2018/05/28/que-es-la-red-pitaya/>.

24. solocodigo.com. [En línea] 15 de 06 de 2011. [Citado el: 15 de 10 de 2018.] <https://solocodigo.com/46049/compilacion-cruzada/>.
25. Un complemento al teorema de Nyquist. Forgach, J.M. Alvarado Reyes y C.E. Stern. ciudad de mexico : REVISTA MEXICANA DE FISICA, 2010.
26. Introducción al filtrado digital. Gutiérrez, Emilia Gómez. Catalunya : s.n., 2009.
27. The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Smith, S.W. s.l. : California Technical Pub, 1997.
28. Diseño de filtros FIR. M. MARTÍNEZ, L. GÓMEZ, A. J. SERRANO, J. VILA, J. GÓMEZ. universidad de valencia : s.n., 2010.
29. M. MARTÍNEZ, L. GÓMEZ, A.J. SERRANO, J. VILA, J. GÓMEZ. digitales, Introducción a los filtros. valencia : universidad de valencia, 2010.
30. Advantages of Blackman Window over Hamming Window Method for designing FIR Filter. Chakraborty, Subhadeep. 8, s.l. : Department of Electronics and Communication Engineering, 2013, Vol. 4. 2229-3345 .
31. Performance Analysis of FIR Filter Design by Using Rectangular, Hanning and Hamming Windows Methods. Sonika Gupta, Aman Panghal. 6, India : Electronics and Communication, MIET (KUK), 2012, Vol. 2. 2277 128X.
32. Discrete-Time Signal Processing. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. New Jersey : Prentice Hall, 1999, Vol. 2.
33. dynamo. www.dynamo-electronics.com. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2018.] <https://www.dynamo-electronics.com/plataformas/15-4wd2-plataforma-robotica-4x4-configurable.html>.
34. www.geekfactory.mx. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2018.] <https://www.geekfactory.mx/tienda/motores-y-controladores/modulo-puente-h-l298n/>.
35. arduino.cl. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2018.] <https://arduino.cl/que-es-arduino/>.
36. Guangzhou HC Information Technology Co., Ltd. Module Data Sheet. [En línea] [Citado el: 18 de 11 de 2018.] https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/HC-06_Wavesen.pdf.
37. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE OBSERVACIONES EN INVESTIGACIÓN,. Lozano-Rivas, William Antonio. Bogota D.C : INVESTEA y Didáctica Ambiental, S.L, 2011.
38. Jose Tomas Gonzales, Mateo Burgos Garcia. SEÑALES Y SISTEMA Teoría de probabilidad.
39. Bluetronic. [En línea] 05 de 03 de 2015. [Citado el: 22 de 06 de 2018.] <https://bluetronic.wordpress.com/2015/03/05/fuentes-lineales-vs-fuentes-conmutadas/>.

10. ANEXOS

10.1 Código en C sistema radar móvil

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <unistd.h>
#include "rp.h"
#include <sys/time.h>
#define COEF 18
#define PERIODO_MUESTREO 100
#define NUMERO_MUESTRAS 3000
#define LEJOS 600
#define MEDIO 1600
#define CERCA 2100
long long int tiempoUs(void);
void delay_ms(int a);
float adc(void);
void dac(void);
void procesamiento(void);
void filtro(void);
static int conteopulsos=0;
float suma,valoractual;
double vectormuestra[NUMERO_MUESTRAS];
float dacl=0;
int conteo=0;
int main () {

    // Initialization of API
    if (rp_Init() != RP_OK) {
        fprintf(stderr, "Red Pitaya API init failed!\n");
        return EXIT_FAILURE;
    }
    rp_DpinSetDirection (7+RP_DIO0_N, RP_OUT);
    rp_DpinSetDirection (6+RP_DIO0_N, RP_OUT);
    rp_DpinSetDirection (5+RP_DIO0_N, RP_OUT);

    long long int tiempoRef1, tiempoRef2;
    tiempoRef1=tiempoUs();
    int conteoMuestras=0;

    while(1){
        tiempoRef2=tiempoUs();
        if((tiempoRef2-tiempoRef1)>PERIODO_MUESTREO){
            // condicion para frecuencia de muestreo
            tiempoRef1=tiempoUs();
            vectormuestra[conteoMuestras]=adc();
            conteoMuestras++;
            if(conteoMuestras>=NUMERO_MUESTRAS){
                // condicion para realizar procesamiento
                procesamiento();
                conteoMuestras=0;
            }
        }
    }
```

```

    }
    rp_Release();
    return EXIT_SUCCESS;
}

float adc(void){ // API adc
    rp_AIpinGetValue(0, &valoradc);
    return valoradc;
}

void filtro(void){
    float value=0;
    double x[COEF]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
    double h[]={-0.002433913089816802,-0.004733513450967084,-
0.007959247474501217,
-
0.006015745363517591,0.010921660256965391,0.049200008368437090,0.10448911
5120973280,
0.160523646918242197,0.196007988714184705,0.196007988714184705,0.16052364
6918242197,
0.104489115120973280,0.049200008368437090,0.010921660256965391,-
0.006015745363517591,
-0.007959247474501217,-0.004733513450967084,-0.002433913089816802,
}; // coeficientes del filtro
    int r;
    for(r=0;r<NUMERO_MUESTRAS;r++){
        x[0]=vectormuestra[r];
        value=0;
        //se agrega un nuevo valor al vector de trabajo x
        int g;
        for(g=0;g<COEF;g++){
            value=value+(h[g]*x[g]); // convolucion
        }
        if(r>10){
            vectormuestra[r]=value;}
        else{
            //dejar el valor de los primeros 10 valores de array
        }
        suma=suma+vectormuestra[r];

        for(g=COEF-1;g>0;g--){
            x[g]=x[g-1]; // corrimiento de la señal
        }
    }
}

void procesamiento(){
    float promedio;
    int i;
    filtro();
    promedio=suma/NUMERO_MUESTRAS;
    suma=0;
    valoractual=0;
    conteopulsos=0;
    for(i=0;i<NUMERO_MUESTRAS;i++){
        valoractual=vectormuestra[i]-promedio;// eliminacion de offset
        valoractual=valoractual*valoractual;// valor absoluto para no
manejar valores negativos
    }
}

```

```

        if(valoractual>0.09){
            conteopulsos++;
        }
        else{
        }
    }
    if(conteopulsos>CERCA){// condiciones de distancia
        rp_DpinSetState (7+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState (6+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState (5+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED4,RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED3,RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED2,RP_HIGH);

    }
    else if(conteopulsos>MEDIO && conteopulsos<(CERCA)){
        rp_DpinSetState (7+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState (6+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState (5+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED4,RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED3,RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED2,RP_HIGH);

    }
    else if(conteopulsos>LEJOS && conteopulsos<(MEDIO)){

        rp_DpinSetState (7+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState (6+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState (5+RP_DIO0_N, RP_HIGH);
        rp_DpinSetState(RP_LED4,RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED3,RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED2,RP_HIGH);}

    else{
        rp_DpinSetState (7+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState (6+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState (5+RP_DIO0_N, RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED4,RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED3,RP_LOW);
        rp_DpinSetState(RP_LED2,RP_LOW);
        entrada1=0;
        entrada2=0;
        conteo=0;}

    }

    long long int tiempoUs(void){// funcion para adquirir milsegundos
    long long int timestamp_usec;
    struct timeval timer_usec;
        if (!gettimeofday(&timer_usec, NULL)) {
            timestamp_usec = (( timer_usec.tv_sec)*1000000
+timer_usec.tv_usec);
        }
        else {
            timestamp_usec = -1;
        }
        return timestamp_usec;

```

}

10.2 Tabla de datos pruebas estáticas

Tabla 13. datos pruebas estáticas

	rango de 2 m 1,5 m			rango de 1,5 m 1m			rango de 1 m 0,5m			rango de 0,5 m 0m		
prueba	led1	led2	led3	led1	led2	led3	led1	led2	led3	led1	led2	led3
1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
2	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
4	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
5	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
7	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
9	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
10	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
11	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
12	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
13	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
14	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
15	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
16	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
17	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
18	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
19	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
20	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
21	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
22	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
23	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
24	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
26	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
27	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
28	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
29	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
30	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
31	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
32	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
33	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
34	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
35	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
36	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
37	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
38	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
39	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
40	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
41	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
42	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
43	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
44	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
45	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
46	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
47	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
48	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
49	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
50	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
51	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
52	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1

	rango de 2 m 1,5 m			rango de 1,5 m 1m			rango de 1 m 0,5m			rango de 0,5 m 0m		
53	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
54	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
55	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
56	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
57	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
58	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
59	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
60	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
61	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
62	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
63	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
64	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
65	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
66	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
67	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
68	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
69	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
70	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
71	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
72	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
73	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
74	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
75	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
76	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1

10.3 Tabla de datos pruebas movimiento

Tabla 14. Datos pruebas en movimiento

OBSTACULO: PERSONA					OBSTACULO: RAMA					OBSTACULO: PARED					OBSTACULO: SILLAS					SIN OBSTÁCULO				
DISTANCIA(m)					DISTANCIA(m)					DISTANCIA(m)					DISTANCIA(m)					DISTANCIA(m)				
prueba	led1	led2	led3		prueba	led1	led2	led3		prueba	led1	led2	led3		prueba	led1	led2	led3		prueba	led1	led2	led3	
1	1,2	1	0,3		1	0,4	x	x		1	1,4	0,8	0,5		1	1,3	0,8	0,4		1	x	x	x	
2	1,1	1	0,3		2	0,3	0,1	x		2	1,3	0,7	0,3		2	1,1	0,6	0,2		2	x	x	x	
3	1,2	1	0,4		3	0,3	0,1	x		3	1,2	0,7	0,3		3	1,2	0,5	0,4		3	x	x	x	
4	1,1	1	0,3		4	0,3	0,1	x		4	1,3	0,8	0,4		4	1,3	0,7	0,3		4	x	x	x	
5	0,9	1	0,3		5	0,3	0,1	x		5	1,3	0,8	0,5		5	1,1	0,7	0,2		5	x	x	x	
6	1,1	1	0,2		6	0,3	x	x		6	1,2	0,8	0,4		6	1,1	0,6	0,3		6	x	x	x	
7	1	1	0,2		7	0,4	0,1	x		7	1,3	0,7	0,4		7	1	0,5	0,5		7	x	x	x	
8	0,9	1	0,2		8	0,3	x	x		8	1,4	0,8	0,3		8	1,2	0,7	0,4		8	x	x	x	
9	1,1	1	0,4		9	0,3	x	x		9	1,3	0,8	0,3		9	1,1	0,5	0,2		9	x	x	x	
10	0,9	1	0,3		10	0,4	0,2	x		10	1,3	0,7	0,4		10	1	0,7	0,3		10	x	x	x	
11	1	1	0,3		11	0,4	0,2	x		11	1,4	0,9	0,2		11	1	0,7	0,3		11	x	x	x	
12	1	1	0,2		12	0,3	0,1	x		12	1,3	0,8	0,4		12	1	0,6	0,5		12	x	x	x	
13	0,9	0	0,3		13	0,4	0,2	x		13	1,4	0,8	0,3		13	1,1	0,7	0,2		13	x	x	x	
14	0,9	1	0,3		14	0,3	0,1	x		14	1,3	0,7	0,2		14	1,2	0,6	0,4		14	0,2	x	x	
15	1,1	1	0,2		15	0,3	x	x		15	1,6	0,9	0,3		15	1,1	0,7	0,5		15	x	x	x	
16	1	0	0,3		16	0,3	0,1	x		16	1,3	0,8	0,3		16	1	0,6	0,3		16	x	x	x	
17	1,2	1	0,3		17	0,4	x	x		17	1,3	0,8	0,2		17	1,2	0,7	0,2		17	x	x	x	
18	1	1	0,3		18	0,3	0,1	x		18	1,2	0,8	0,5		18	1	0,7	0,4		18	0,2	x	x	
19	0,9	1	0,2		19	0,3	x	x		19	1,3	0,8	0,3		19	1,1	0,7	0,5		19	x	x	x	
20	1,1	1	0,3		20	0,4	0,2	x		20	1,1	0,9	0,4		20	1,1	0,8	0,3		20	x	x	x	
21	1,1	1	0,3		21	0,4	x	x		21	1,4	0,8	0,2		21	1,1	0,6	0,4		21	x	x	x	
22	1	1	0,2		22	0,3	0,1	x		22	1,4	0,8	0,3		22	1	0,6	0,4		22	0,2	0,1	x	
23	1	1	0,3		23	0,4	x	x		23	1,4	0,7	0,3		23	1	0,7	0,2		23	x	x	x	
24	0,9	1	0,4		24	0,3	0,1	x		24	1,3	0,6	0,3		24	0,9	0,5	0,3		24	x	x	x	
25	1	1	0,1		25	0,2	0,1	x		25	1,2	0,7	0,4		25	1	0,6	0,2		25	x	x	x	
26	1,1	1	0,4		26	0,3	x	x		26	1,1	0,8	0,5		26	1,1	0,5	0,2		26	x	x	x	
27	1	1	0,3		27	0,2	0,1	x		27	1,3	0,7	0,4		27	1	0,6	0,4		27	x	x	x	

OBSTACULO: PERSONA					OBSTACULO: RAMA					OBSTACULO: PARED					OBSTACULO: SILLAS					SIN OBSTÁCULO				
28	1,1	1	0,3		28	0,3	x	x		28	1,3	0,8	0,4		28	1,1	0,5	0,4		28	x	x	x	
29	1	1	0,4		29	0,3	0,1	x		29	1,3	0,8	0,3		29	1	0,5	0,4		29	0,2	0,1	x	
30	1,1	1	0,2		30	0,3	x	x		30	1,3	0,9	0,2		30	1,1	0,6	0,3		30	x	x	x	
31	1	1	0,3		31	0,2	0,1	x		31	1,2	0,8	0,4		31	1	0,7	0,4		31	x	x	x	
32	1	1	0,4		32	0,3	x	x		32	1,1	1	0,2		32	1	0,5	0,2		32	x	x	x	
33	1,2	1	0,3		33	0,3	x	x		33	1,3	0,8	0,4		33	1,2	0,6	0,4		33	x	x	x	
34	1,1	1	0,3		34	0,4	0,1	x		34	1,4	0,9	0,2		34	1,1	0,7	0,2		34	x	x	x	
35	1,2	1	0,1		35	0,4	x	x		35	1,5	0,4	0,2		35	1,2	0,8	0,3		35	x	x	x	
36	1,1	1	0,3		36	0,3	0,1	x		36	1,3	0,8	0,3		36	1,1	0,9	0,3		36	x	x	x	
37	1	1	0,3		37	0,2	x	x		37	1,3	0,4	0,3		37	1	0,7	0,4		37	x	x	x	
38	0,8	1	0,2		38	0,3	0,1	x		38	1,5	0,7	0,3		38	1	0,6	0,3		38	0,2	0,1	x	
39	1	1	0,4		39	0,2	x	x		39	1,2	0,9	0,5		39	1	0,9	0,3		39	x	x	x	
40	1,2	1	0,3		40	0,3	x	x		40	1,3	0,7	0,2		40	1,2	0,8	0,3		40	x	x	x	
41	1	0	0,2		41	0,4	0,1	x		41	1,2	0,8	0,2		41	1	0,4	0,3		41	x	x	x	
42	0,9	1	0,3		42	0,2	x	x		42	1,3	0,7	0,2		42	0,9	0,5	0,2		42	x	x	x	
43	0,8	1	0,2		43	0,3	0,1	x		43	1,4	0,9	0,4		43	0,9	0,6	0,3		43	x	x	x	
44	1	1	0,2		44	0,3	x	x		44	1,4	0,8	0,2		44	1	0,6	0,4		44	x	x	x	
45	1,2	1	0,2		45	0,4	0,1	x		45	1,2	0,7	0,2		45	1,2	0,7	0,1		45	0,2	0,1	x	
46	1,1	1	0,3		46	0,3	0,2	x		46	1,1	0,9	0,2		46	1,1	0,7	0,3		46	x	x	x	
47	1	1	0,4		47	0,3	x	x		47	1,3	0,9	0,1		47	1	0,6	0,3		47	x	x	x	
48	1,1	1	0,2		48	0,2	0,1	x		48	1,4	0,7	0,2		48	1,1	0,6	0,4		48	x	x	x	
49	1	1	0,2		49	0,2	x	x		49	1,1	0,9	0,2		49	1,2	0,7	0,5		49	x	x	x	
50	1,1	1	0,3		50	0,3	0,2	x		50	1,2	0,8	0,5		50	1,1	0,5	0,2		50	x	x	x	
51	1	1	0,3		51	0,3	x	x		51	1,3	0,8	0,3		51	1	0,6	0,3		51	x	x	x	
52	1	1	0,3		52	0,3	0,1	x		52	1,1	0,9	0,3		52	1	0,5	0,2		52	0,2	0,1	x	
53	1,1	1	0,2		53	0,3	0,1	x		53	1,3	0,7	0,4		53	1,1	0,7	0,3		53	x	x	x	

La X significa que no hubo detección.